



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ KOMUNÁLNÍCH ODPADŮ  
V ENERGETICE**

EFFECTIVE UTILIZATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE IN HEAT AND POWER  
SYSTEMS

**DIZERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ing. Tomáš Ferdan

**ŠKOLITEL**

SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

BRNO 2017

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá efektivním využitím odpadů v energetice se zaměřením na směsný komunální odpad. Efektivita je v práci hodnocena jak z pohledu ekonomického, tak z pohledu ekologického. V úvodní části této práce je poukázáno na současnou situaci a legislativní rámec v oblasti odpadového hospodářství a energetiky Evropské unie. Následně je představen optimalizační nástroj NERUDA, jenž byl vytvořen na pracovišti autora. NERUDA je složen ze základních modulů, na jejichž vytvoření se podílel autor dizertační práce.

Práce má dvě stěžejní části, které popisují dva vstupní moduly pro následné výpočty softwarovým systémem NERUDA. První se zabývá technicko-ekonomickým modelem zařízení pro energetické využití odpadu, který je nazván *Flexi model*. Jeho hlavním výstupem je závislost ceny za zpracování odpadu na zpracovatelské kapacitě. Druhá část je věnována implementaci nového modulu do systému NERUDA. Tento modul se zabývá ekologickým kritériem pro hodnocení efektivity využití odpadu v odpadovém hospodářství potažmo energetice.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Technický model, energetické využití odpadů, NERUDA, skleníkové plyny, oteplování

## ABSTRACT

This work focuses on effective utilization of municipal solid waste in heat and power systems. The effectivity in this work is evaluated from an economic as well as an environmental viewpoint. In the introductory part a review of legislation and state-of-the art in the fields of energetics and waste management of European Union is presented. Next an optimization tool NERUDA, created on the author's workplace, is introduced. NERUDA consists of basic modules on which creation has the author been participating.

The thesis is divided into two main parts that describes two NERUDA's modules. First deals with a techno-economic model of waste-to-energy plants and is called Flexi model. The main output is a dependency of gate fee on capacity. Second part is devoted to the implementation of new module into the NERUDA system. This module is an environmental criterion for evaluation of the effectivity of waste utilization in the waste management and energetics.

## KEY WORDS

Technical model, waste-to-energy, NERUDA tool, global warming potential

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE**

FERDAN, T. *Efektivní využití komunálních odpadů v energetice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 91 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c..

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Petra Stehlíka, CSc., dr. h. c., na základě vlastních poznatků získaných při studiu a konzultací s odborníky a že jsem veškeré literární a obrazové prameny správně a úplně citoval.

V Brně dne 22. dubna 2017

.....

Ing. Tomáš Ferdan

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc., dr. h. c. za poskytnutí kvalitních podmínek v průběhu studia. Dále děkuji Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. za odborné rady a připomínky v oblastech energetiky, teplárenství a odpadovém hospodářství. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům a blízkým za jejich trpělivost a podporu, kterou mi věnovali v průběhu vypracování této práce.

Tato práce vznikla v rámci výzkumného projektu č. TE02000236 "Waste-to-Energy (WTE) Competence Centre" (WtECC) a projektu "Laboratoř integrace procesů pro trvalou udržitelnost" č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/15\_003/0000456 (SPIL).

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Celosvětové emise skleníkových plynů z ekonomického sektoru [3] .....	11
Obr. 2 Vývoj účinnosti výroby elektřiny v EU 27 [4] .....	12
Obr. 3 Hierarchie nakládání s odpadem [7] .....	12
Obr. 4 Podíl obnovitelné frakce v KO.....	14
Obr. 5 Skládky odpadu S-OO [14].....	15
Obr. 6 Schéma MBÚ uvažovaných v nástroji NERUDA .....	18
Obr. 7 Schéma MÚ.....	19
Obr. 8 Zjednodušené schéma hlavních energetických vstupů a výstupů v zařízení EVO .....	20
Obr. 9 Hlavní myšlenka výpočtového nástroje NERUDA [28] .....	23
Obr. 10 Komplexní systém logistické síťové úlohy NERUDA .....	24
Obr. 11 Schéma spalovny v Liberci .....	29
Obr. 12 Regresní funkce pro výpočet množství páry [46] .....	30
Obr. 13 Implementace modelu spalovny TERMIZO v MS Excel .....	31
Obr. 14 Schéma spalovny v Praze.....	32
Obr. 15 Návaznost finančních toků ve Flexi modelu .....	36
Obr. 16 Shrnutí vstupů a výstupů Flexi modelu.....	38
Obr. 17 Uživatelské rozhraní Flexi modelu .....	39
Obr. 18 Příklad průběhu poptávky po teple v lokalitě Jihlava .....	40
Obr. 19 Struktura výnosů projektu EVO: a) projekt s dostatečnou kapacitou CZT; b) projekt s nedostatečnou CZT .....	40
Obr. 20 Struktura nákladů projektu EVO.....	41
Obr. 21 Struktura výnosů projektu EVO: a) technologie 6, 7, 8; b) technologie 12, 13, 14....	43
Obr. 22 Závislosti výnosů na dodávce tepla .....	43
Obr. 23 Struktura nákladů projektu EVO: a) technologie 6, 8, 12, 14; b) technologie 7, 13...	44
Obr. 24 Výnosy a náklady technologií malých kapacit .....	44
Obr. 25 Vliv bonusů na strukturu výnosů: a) technologie 7; b) technologie 14 .....	45
Obr. 26 Závislost ceny na bráně a kapacity zařízení .....	46
Obr. 27 Průběh IRR po dobu životnosti projektu: a) poplatek 1500 Kč/t; b) poplatek 2500 Kč/t.....	46
Obr. 28 Uživatelské rozhraní pro automatický výpočet ceny na bráně pro různá nastavení ...	47
Obr. 29 Histogram rozdělení cen na bráně pro kapacitu 150 kt/r .....	48
Obr. 30 Závislost ceny na bráně na kapacitě.....	48

Obr. 31 Interval cen na bráně pro různá zařízení a poplatky/daně.....	49
Obr. 32 Závislost vnitřního výnosového procenta na výhřevnosti zpracovávaného odpadu... 50	50
Obr. 33 Závislost ceny na bráně na výhřevnosti zpracovávaného odpadu. ....	50
Obr. 34 Vliv výhřevnosti odpadu na výrobu elektřiny a tepla .....	51
Obr. 35 Závislost koeficientu pro korekci měsíční dodávky tepla na poměru měsíčního .....	52
Obr. 36 Uživatelské rozhraní pro výpočet ceny na bráně s využitím náhodných parametrů... 53	53
Obr. 37 Příklad využití citlivostní analýzy ve Flexi modelu – závislost ceny na bráně na ceně tepla .....	53
Obr. 38 EVO: Graf průměrné roční GWP vztaženého na 1 tunu odpadu .....	60
Obr. 39 EVO: GWP jako funkce procentuálního využití výroby tepla.....	61
Obr. 40 Závislost mezi GWP a kapacitou (a) a mezi cenou na bráně a kapacitou (b), upraveno na základě [53] .....	62
Obr. 41 Skládka - Graf průměrné roční GWP vztaženého na 1 tunu odpadu, stupeň odplynění skládky 60% .....	64
Obr. 42 MBÚ - Graf průměrné roční GWP vztaženého na 1 tunu odpadu.....	66
Obr. 43 MÚ - Graf průměrné roční GWP vztaženého na 1 tunu odpadu.....	67
Obr. 44 Monoblok - Graf průměrné roční GWP vztaženého na 1 tunu odpadu .....	68
Obr. 45 Monoblok: GWP jako funkce procentuálního využití výroby tepla .....	69
Obr. 46 Doprava - Graf GWP vztaženého na 1 tunu odpadu.....	70
Obr. 47 Výsledky výpočtu NERUDA: množství odpadu zpracovaného v EVO v závislosti na ceně emisních povolenek a skládkovacího poplatku.....	74
Obr. 48 Výsledky výpočtu NERUDA: závislost celkových nákladů na zpracování SKO na emisích skleníkových plynů .....	75

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Způsob zpracování komunálního odpadu v EU v roce 2015 [10] .....	13
Tab. 2 Nastavitelné parametry flexi modelu - příklad.....	35
Tab. 3 Hodnoty GWP pro vybrané skleníkové plyny a různé časové horizonty [55].....	54
Tab. 4 Průměrné složení SKO pro ČR, data z nástroje Justine a společnosti bifa .....	56
Tab. 5 Složení TAP uvažovaných v této práci [33] .....	57
Tab. 6 Palivový mix energetiky a teplárenství ČR, data [59], [60] a [61] .....	58
Tab. 7 Hodnoty GWP pro body korespondující s okrajovými body v obr. 40 .....	62
Tab. 8 Výsledné hodnoty GWP pro řetězce zpracování odpadů.....	71



# OBSAH

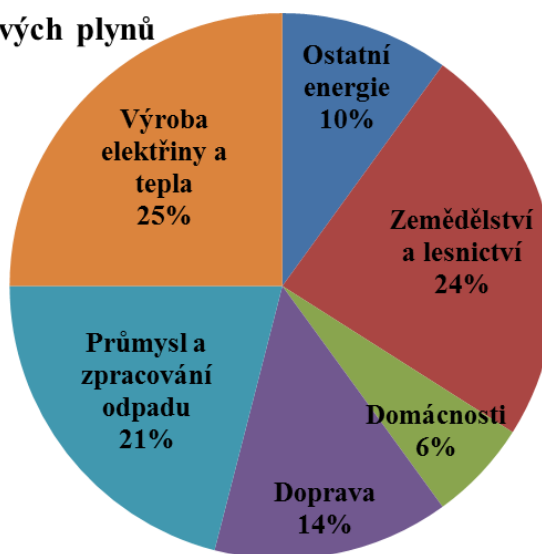
1	ÚVOD.....	11
1.1	Současná situace a legislativní rámec .....	11
1.2	zpracování Směsného komunálního odpadu .....	14
1.2.1	<i>Skládkování .....</i>	<i>14</i>
1.2.2	<i>Mechanicko-biologická úprava.....</i>	<i>16</i>
1.2.3	<i>Energetické využití .....</i>	<i>19</i>
2	CÍLE PRÁCE V NÁVAZNOSTI NA KOMPLEXNÍ SYSTÉMOVÉ ŘEŠENÍ .....	22
2.1	Modulární systém Nástroje <i>NERUDA</i> .....	22
2.2	Cíle dizertační práce .....	26
3	TECHNICKO-EKONOMICKÉ MODEL Y <i>EVO</i> .....	27
3.1	Model výroby v provozu <i>TERMIZO</i> .....	28
3.1.1	<i>Popis technologie TERMIZO .....</i>	<i>28</i>
3.1.2	<i>Technicko-ekonomický model TERMIZO.....</i>	<i>29</i>
3.2	Model výroby v provozu <i>ZEVO Malešice</i> .....	31
3.2.1	<i>Popis technologie ZEVO Malešice.....</i>	<i>31</i>
3.2.2	<i>Technicko-ekonomický model ZEVO Malešice .....</i>	<i>32</i>
3.3	Flexi model.....	34
3.3.1	<i>Popis uživatelského rozhraní a základní funkce Flexi modelu.....</i>	<i>38</i>
3.3.2	<i>Analýza struktury nákladů a výnosů zařízení EVO .....</i>	<i>39</i>
3.3.3	<i>Vliv velikosti a technologického uspořádání zařízení na strukturu nákladů a výnosů.....</i>	<i>41</i>
3.3.4	<i>Analýza vlivu ceny na bráně na IRR projektu .....</i>	<i>45</i>
3.3.5	<i>Backsolving a automatizovaný výpočet ceny na bráně při požadované návratnosti projektu .....</i>	<i>46</i>
3.3.6	<i>Analýza vlivu výhřevnosti odpadu na ekonomiku projektu .....</i>	<i>49</i>
3.3.7	<i>Koeficienty zohledňující nerovnoměrnost v dodávkách tepla .....</i>	<i>51</i>
3.3.8	<i>Citlivostní analýza s využitím náhodných parametrů .....</i>	<i>52</i>
4	ENVIRONMENTÁLNÍ DOPAD.....	54
4.1	Složení odpadu .....	56
4.2	<i>GWP – Zařízení EVO.....</i>	<i>57</i>
4.3	<i>GWP – Skládkování .....</i>	<i>63</i>
4.4	<i>GWP – Mechanicko-biologická úprava .....</i>	<i>65</i>

4.5	<i>GWP</i> – Využití Tuhých alternativních paliv .....	67
4.6	<i>GWP</i> – Doprava .....	69
4.7	Řetězec zpracování odpadů .....	70
5	<i>GWP</i> V NÁSTROJI NERUDA .....	72
5.1	Systém evropského obchodování s emisními povolenkami .....	72
5.2	Výpočet v nástroji neruda .....	73
6	ZÁVĚR .....	76
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	78
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	84
	SEZNAM PŘÍLOH .....	86

# 1 ÚVOD

Tato práce se zabývá efektivním využitím komunálního odpadu v energetice. Práce je součástí unikátního komplexního systému, vytvořeného v Sekci energetických systémů a simulačních výpočtů na Ústavu procesního inženýrství (ÚPI) na FSI VUT Brno. Hlavním předmětem zájmu je tzv. energetické využití odpadů (EVO). Pojem efektivní využití v této práci znamená: optimální rozložení plánovaných zpracovatelských kapacit zařízení EVO v rámci předmětného regionu (zde příklad pro celou ČR). K efektivnímu návrhu je zde přistupováno nejen z pohledu ekonomického, ale hlavně z pohledu ekologického. Efektivitu zařízení EVO, ať už ekonomickou nebo ekologickou, nelze hodnotit samostatně pouze z pohledu energetiky, ale musí být zahrnuto i optimální využití v rámci odpadového hospodářství. Dle Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC) patří sektory energetiky a odpadového hospodářství mezi největší přispěvovatele ke zvýšeným koncentracím skleníkových plynů v atmosféře, viz obr. 1. Výroba elektřiny a tepla z fosilních paliv je díky svým 25 % vůbec největším producentem skleníkových plynů. Sektor odpadového hospodářství tvoří více než 5 % celkových emisí skleníkových plynů, kdy největší část přes 90 % zaujímají sklárky produkci skládkového plynu, jak uvádí např. [1] a [2]. Efektivní návrh umístění a kapacit zařízení EVO může pomoci ke snížování ekologické zátěže jak z energetického sektoru, tak sektoru odpadového hospodářství.

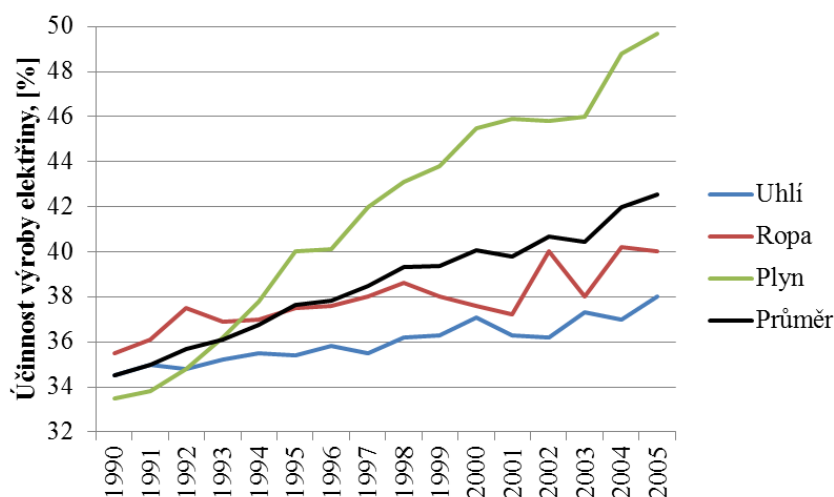
**Emise skleníkových plynů**



*Obr. 1 Celosvětové emise skleníkových plynů z ekonomického sektoru [3]*

## 1.1 SOUČASNÁ SITUACE A LEGISLATIVNÍ RÁMEC

V současnosti se stále více řeší problematika energetických zdrojů od spolehlivé dodávky, přes palivovou základnu, po problémy spojené s ochranou ovzduší. Celosvětově je tendence zvyšovat účinnost výroby energie z fosilních paliv – z ropy, uhlí, plynu, viz obr. 2. Zásoby primárních zdrojů nejsou neomezené a odhady se shodují, že v horizontu 100 až 150 let dojde k jejich vyčerpání.



**Obr. 2 Vývoj účinnosti výroby elektřiny v EU 27 [4]**

Z těchto důvodů je stále více kladen důraz na využití energie obnovitelných (OZE) a druhotných zdrojů (DZE) s cílem snížit závislost na primárních energetických zdrojích.

Jednou z možných cest jak snížit závislost na fosilních palivech může být právě energetické využití odpadů (EVO). Tomuto trendu nahrává také legislativní prostředí Evropské unie. V roce 1999 evropský parlament schválil směrnici Rady evropské unie 1999/31/ES [5], která do roku 2020 ukládá státům povinnost snížit podíl skládkovaného biodegradabilního odpadu na 35 % z objemu ukládaného na skládky v roce 1995. Dalšími předpisy vydanými Evropskou unií ve vztahu ke zpracování odpadu jsou směrnice 2006/12/ES [6] a navazující směrnice 2008/98/ES [7]. Tyto směrnice definují tzv. hierarchii nakládání s odpady (obr. 3), kdy na prvním místě je prevence vzniku odpadu, poté jeho opětovné používání a dále recyklace následovaná energetickým využitím.



**Obr. 3 Hierarchie nakládání s odpadem [7]**

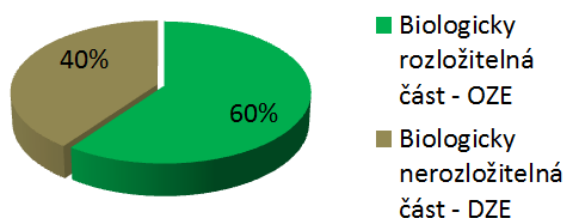
Teprve odpady, které není možné již nijak využít, by měly být odstraňovány – spalováním bez energetického využití nebo skládkováním. Pravidla z předchozích verzí těchto směrnic jsou v ČR implementovány v zákoně č. 185/2001 Sb. o odpadech [8]. V současnosti se připravuje jeho novela (uzavřeno připomínkové řízení), která mimo jiné stanovuje, jaký odpad nebude možné ukládat na skládky od roku 2024 [9]. V poslední verzi návrhu bylo uvedeno, že nebude možné skládkovat odpad s výhřevností v sušině vyšší než 6,5 MJ/kg a dále bude pravděpodobně výhřevnost doplněna o parametr stability AT4 vyšší než 10 mg O<sub>2</sub>/g sušiny. Produkce a nakládání s odpady v zemích Evropské unie (EU) v současné době jsou shrnuty v tab. 1.

**Tab. 1 Způsob zpracování komunálního odpadu v EU v roce 2015 [10]**

	Produkce komunálního odpadu (v kg na osobu)	Celkové množství zpracovaného odpadu (v kg na osobu)	Zpracování komunálního odpadu (v %)			
			Skládkování	Energetické využití	Recyklování	Kompostování
<b>EU28</b>	476	463	122	126	137	78
<b>Belgie</b>	418	408	4	181	143	80
<b>Bulharsko</b>	419	412	278	11	80	43
<b>ČR</b>	316	316	166	56	81	13
<b>Dánsko</b>	789	789	9	415	215	150
<b>Německo</b>	625	610	1	196	299	114
<b>Estonsko</b>	359	313	26	185	89	13
<b>Irsko</b>	587	532	224	93	181	34
<b>Řecko</b>	506	506	408	0	79	19
<b>Španělsko</b>	434	434	239	50	73	71
<b>Francie</b>	501	501	129	174	112	87
<b>Chorvatsko</b>	393	384	313	0	64	7
<b>Itálie</b>	486	432	129	92	126	86
<b>Kypr</b>	638	590	475	0	85	30
<b>Lotyšsko</b>	433	366	250	0	92	24
<b>Litva</b>	448	442	242	52	103	46
<b>Lucembursko</b>	625	625	110	213	178	124
<b>Maďarsko</b>	377	377	202	53	98	23
<b>Malta</b>	624	601	558	2	42	0
<b>Nizozemí</b>	523	523	7	245	129	142
<b>Rakousko</b>	560	548	17	212	144	175
<b>Polsko</b>	286	286	127	38	75	46
<b>Portugalsko</b>	453	453	222	94	74	64
<b>Rumunsko</b>	247	216	178	6	14	18
<b>Slovinsko</b>	449	421	102	77	208	34
<b>Slovensko</b>	329	310	226	35	25	24
<b>Finsko</b>	500	500	57	239	141	62
<b>Švédsko</b>	447	447	4	229	145	70
<b>V. Británie</b>	485	472	109	152	132	79
<b>Island</b>	533	533	354	20	114	46
<b>Norsko</b>	422	415	14	221	110	70
<b>Švýcarsko</b>	725	725	0	343	231	151
<b>Černá Hora</b>	533	518	488	0	30	0
<b>Makedonie</b>	370	370	370	:	:	:
<b>Albánie</b>	-	:	336	:	40	:
<b>Srbsko</b>	259	194	192	0	2	0
<b>Turecko</b>	400	352	350	:	:	2
<b>Bosna a Hercegovina</b>	311	233	233	0	0	0
<b>Kosovo</b>	178	:	177	:	:	:

Současná produkce odpadů, ať už komunálních (produkovaných obyvatelstvem), průmyslových, nebo nebezpečných (produkované průmyslovou sférou), rozvojem společnosti

roste. Vzhledem k tématu práce je hlavním předmětem zájmu komunální odpad (KO). Z hlediska evidence odpadů je KO chápán v rozšířené podobě jako „Odpady z domácností a podobné živnostenské, průmyslové odpady a odpady z úřadů, včetně složek odděleného sběru“ [11]. Podmnožinou KO je směsný komunální odpad (SKO). Jedná se o zbytkový odpad po vytřídění všech využitelných frakcí z KO. SKO je pak typ odpadu, který je v rámci dodržení hierarchie nakládání s odpadem vhodný pro energetické využití. V roce 2016 byla produkce KO zhruba 3 000 kt/r z toho produkce SKO zaujímá zhruba 2 000 kt/r. Z pohledu EVO je důležitý §2 zákona č. 165/2012 Sb. [12], kde je uvedeno, že biologicky rozložitelná část komunálního odpadu (BRKO) je biomasou a tedy i obnovitelným zdrojem energie. Podíl BRKO na energetickém obsahu nevytříděného komunálního odpadu je stanoven vyhláškou 477/2012 Sb. na 60 % [9], pokud výrobce neprokáže jinou hodnotu. Z tohoto tedy vyplývá, že je možné komunální odpad rozdělit na obnovitelný zdroj energie a druhotný zdroj energie v poměru 60 ku 40 % (obr. 4) a podle toho například určit na jaké druhy podpory zařízení (EVO) dosáhne a důležitý je rovněž pro výpočet množství podporované elektřiny v kategoriích DZE a OZE.



*Obr. 4 Podíl obnovitelné frakce v KO*

## 1.2 ZPRACOVÁNÍ SMĚSNÉHO KOMUNÁLNÍHO ODPADU

Způsobů, kterými lze naložit s SKO, je celá řada a existuje nespočet drobných modifikací. V rámci těchto systémů lze rozlišit některé základní kategorie, jakými jsou skládkování, mechanicko-biologická úprava a energetické využití termickým rozkladem. SKO je zbytkový odpad, jeho další recyklace či materiálové využití je problematické. Jednotlivé způsoby zpracování SKO uvažované v této práci a následně v nástroji NERUDA (viz kapitola 2.1) jsou zvlášť rozebrány v následujícím textu.

### 1.2.1 Skládkování

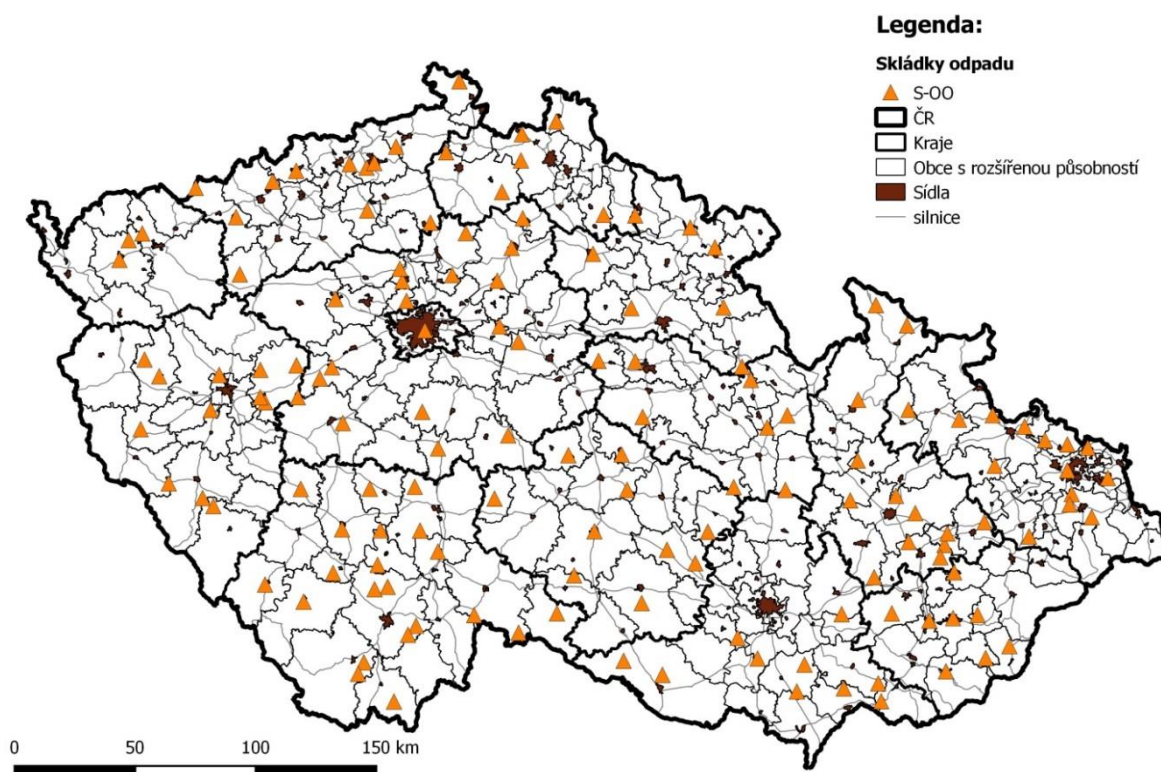
Skládka je zařízení určené k odstraňování odpadů trvalým a řízeným uskladněním na zemi nebo do země. Při ukládání odpadů musí být odpady uloženy podle druhů, kategorií a chemických vlastností tak, aby nemohlo dojít k nežádoucí vzájemné reakci za vzniku škodlivých látek. Skládky se dělí dle technického zabezpečení a provozování do následujících skupin [13]:

- Skládka inertního odpadu S-IO je určena pro inertní odpady. Inertní odpad nemá nebezpečné vlastnosti a nedochází u něj za normálních klimatických podmínek k žádným významným fyzikálním, chemickým nebo biologickým změnám. Inertní odpad nehoří ani jinak chemicky či fyzikálně nereaguje, nepodléhá biologickému

rozkladu ani nezpůsobuje rozklad jiných látek. Směsné odpady se nepovažují za odpad inertní. Příkladem mohou být rezidua vystupující z roštové části zařízení EVO (škvára).

- Skládka ostatních odpadů S-OO je určena pro kategorie ostatní odpad. Dále se dělí na podskupiny dle obsahu organických biologicky rozložitelných látek (S-OO1 a S-OO3). Tyto skládky jsou určeny k ukládání SKO a v této práci bude dále pracováno pouze s tímto typem. V dalších kapitolách bude pro zjednodušení pod pojmem „skládka“ rozuměn tento typ.
- Skládka nebezpečných odpadů S-NO je určena pro odpady kategorie nebezpečný odpad. Jedná se například o rezidua z čištění spalin.

Na následujícím obr. 5 je zobrazena mapa skládek ostatních odpadů v ČR.



*Obr. 5 Skládky odpadu S-OO [14]*

Skládkování má, podobně jako ostatní způsoby odstraňování odpadu, své postupy a technologie. Odpad je ukládán buď do otevřených prohlubní, nebo se vrší nad úroveň terénu. Oba způsoby lze kombinovat. Zvláštním případem jsou skládky podzemní, využívající přirozené nebo uměle vytvořené dutiny pod povrchem země.

Každá skládka má několik ochranných vrstev. Základem je těsnicí vrstva, která brání úniku tzv. skládkových vod a výluhů do okolního prostředí a podzemních vod. Skládky jsou také vybaveny odvodňovací vrstvou, která prostřednictvím drenážního potrubí odvádí skládkovou vodu do speciální zabezpečené jímky. Skládková voda je vlastně srážková voda, která naprší na plochu skládky a prosákne uloženým odpadem. Na skládce dále vzniká i skládkový plyn,

který je tvořen převážně metanem  $\text{CH}_4$  a oxidem uhličitým  $\text{CO}_2$  a vzniká při rozkladu biologických složek. Provozovatelé skládek se snaží tento plyn jímat. Účinnost zachytu se pohybuje v rozmezí 50 až 100 % [15]. Zachycený plyn je dále možné spalovat na fléře, anebo energeticky využít v kogenerační jednotce [15]. Jak bude ukázáno v modelu v kapitole 4.3, únik skládkového plynu, který je považován za skleníkový plyn, je hlavní příčinou toho, že při výpočtu ekologické zátěže jednotlivých způsobů zpracování odpadů je skládkování hodnoceno jako nejhorší.

Skládkování stále patří k nejčastějšímu způsobu zpracování směsného komunálního odpadu v ČR. Dle Integrovaného systému odpadového hospodářství (ISOH, 2015) bylo uloženo na skládku kolem 55 % z celkové produkce KO. Skládky přitom představují v hierarchii nakládání s odpadem až poslední možnost. Jak již bylo nastíněno v úvodu, tak ČR v současnosti podniká legislativní kroky k omezení skládkování KO. Nejdůležitějšími právními předpisy co se skládkování týče, jsou vyhláška č. 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu [13] a návrh novely zákona o odpadech [7]. Tyto předpisy mimo jiné stanovují:

- Vyhláška č. 294/2005 Sb. [13] – Závazek do roku 2020 odklonit od skládkování 65 % biodegradabilního odpadu v porovnání s množstvím ukládaným v roce 1995.
- Novela zákona o odpadech [9] – Definice skládkovatelných odpadů po roce 2024 dle novely „Na skládky je od roku 2024 zakázáno ukládat odpady, jejichž výhřevnost v sušině je vyšší než 6.5 MJ/kg, odpady, které nesplní parametr biologické stability AT4 vymezený v příloze č. 9 k tomuto zákonu, a odpady, které je za stávajícího stavu vědeckého a technického pokroku možné účelně recyklovat.“
- Novela zákona o odpadech [9] – Skládkování bude povoleno, pokud se ve vzdálenosti do 100 km nebude nacházet zařízení pro využití nebo recyklaci takového druhu odpadu. Z tohoto vyplývá, potřeba nástroje pro optimální rozmístění zpracovatelských kapacit, viz kapitola 2.1.
- Novela zákona o odpadech [9] – Stanovuje velikost poplatku za ukládání odpadů na skládku. Současný návrh rozděluje odpad na využitelný a zbytkový, kde využitelný je ten, který bude zakázáno skládkovat, viz výše. Sazba poplatku pro období 2018 až 2024 je pro zbytkový odpad 500 Kč/t a pro využitelný roste po zhruba 200 Kč/t z 900 Kč/t v roce 2018 na hodnotu 2000 Kč/t v roce 2024.

Skládkovací poplatek je každoročně diskutovaným tématem, a proto návrh v současné verzi novely zákona o odpadech nemusí být konečným. Tato nejistota je v nástroji NERUDA zastoupena různými scénáři vývoje tohoto poplatku.

### **1.2.2 Mechanicko-biologická úprava**

Mechanicko-biologická úprava (MBÚ) představuje technologický proces zpracování především směsných komunálních odpadů pomocí mechanické úpravy, roztržení odpadů a následnou biologickou úpravu. V české legislativě byla mechanicko-biologická úprava definována vyhláškou č. 482/2005 Sb. [16] jako „úprava směsného komunálního odpadu a průmyslového odpadu svou charakteristikou a složením podobného komunálnímu odpadu, spočívající v kombinaci fyzikálních postupů, kterými jsou například drcení a třídění, a biologických postupů, jejímž výsledkem je oddělení některých složek odpadu, stabilizace



biologicky rozložitelných složek odpadu a případně další úprava oddělených složek odpadu.“ Tato vyhláška je aktualizována vyhláškou č. 477/2012 Sb. [17], kde tato definice již uvedena není.

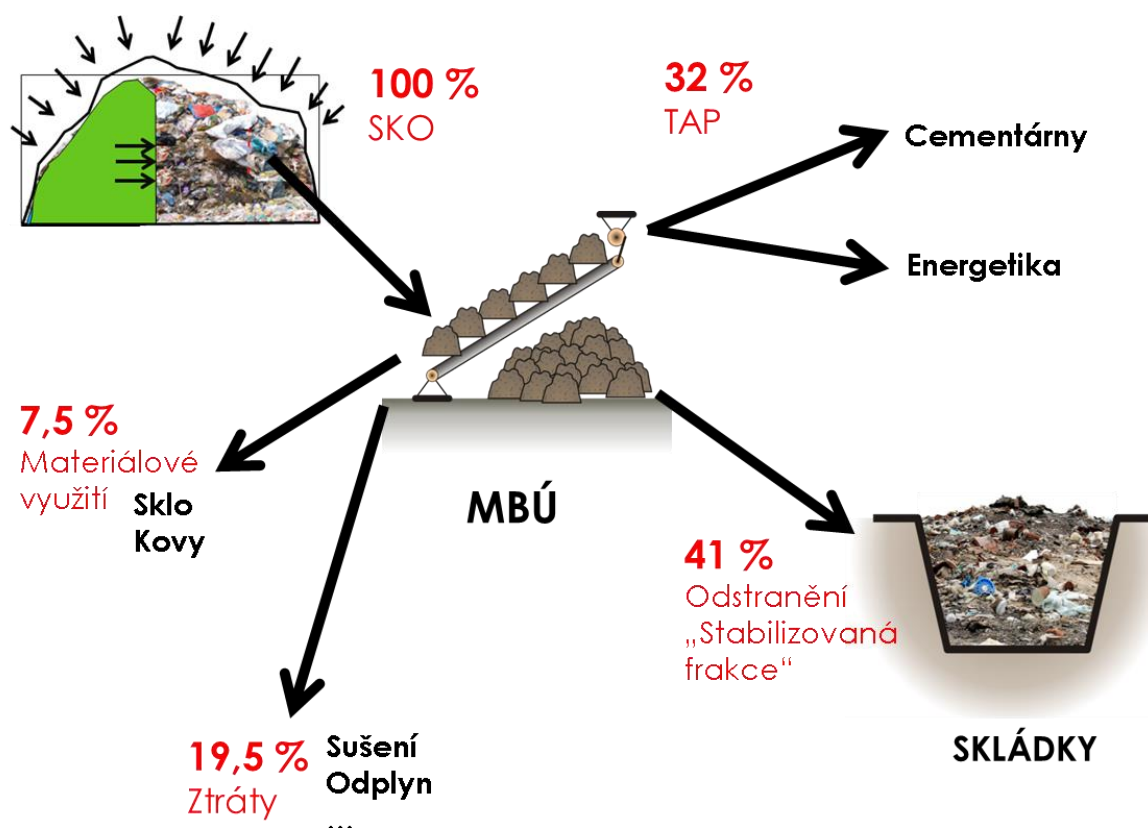
Vstupujícími odpady do zařízení MBÚ jsou především SKO, dále některé živnostenské nebo průmyslové odpady. Technické řešení a uspořádání zařízení MBÚ je velmi variabilní a závisí na konkrétních podmínkách (svozová oblast, složení zpracovávaného odpadu, výrobci zařízení a zemi, kde je zařízení provozováno atd.). Dle technologického postupu lze procesy MBÚ rozdělit do tří skupin:

- technologie mechanicko-biologické úpravy
- technologie mechanicko-biologické stabilizace (bio-sušení)
- technologie mechanicko-fyzikální úpravy / stabilizace (fyzikální sušení).

V praxi se jedná o kombinaci mechanických, fyzikálních a biologických postupů, kdy se z odpadu nejprve vytřídí nežádoucí biologicky nerozložitelné materiály (kovy, plasty, sklo, apod.) a poté se odpad stabilizuje. Biologicky rozložitelné složky odpadů jsou stabilizovány prostřednictvím aerobních či anaerobních procesů. Aerobní stabilizace probíhá formou kompostování v kompostovacích tunelech, boxech apod. Anaerobní fermentace (anaerobní digesce) probíhá mokrou či suchou cestou. Po aerobním nebo anaerobním zpracování následuje dále fáze dokončení tlení aerobním způsobem. Takto stabilizované odpady již na skládce nepodléhají biologickému rozkladu, čímž je výrazně snížena tvorba skládkového plynu [18]. Díky tomuto je z pohledu produkce skleníkových plynů technologie MBÚ několikanásobně lepší než skládkování neupraveného SKO, jak bude ukázáno v kapitole 4.

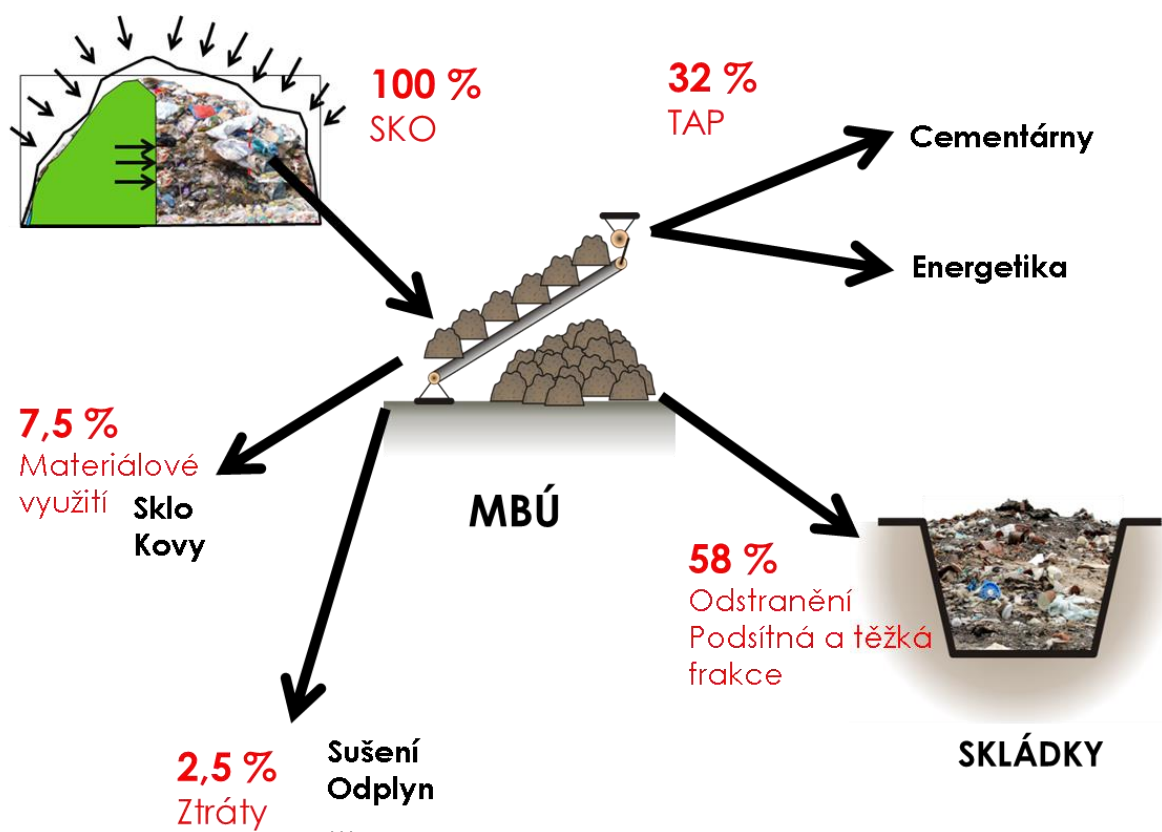
U většiny moderních zařízení MBÚ se vyskytuje ještě mechanické dokončení úpravy materiálu. Mohou zde být odděleny např. nevhodné frakce, drobné spalitelné materiály, výhřevné frakce apod. Výhřevné frakce mohou být upraveny na tzv. tuhé alternativní palivo (TAP, nebo RDF z anglického Refused Derived Fuel). Toto palivo má vyšší výhřevnost 16 až 25 GJ/t oproti 8 až 10 GJ/t u neupraveného SKO. TAP je použitelné ke spalování v zařízeních podobných klasickým spalovnám, které jsou přizpůsobeny na spalování výhřevnějšího paliva (tzv. monobloky, bude využíváno dále v práci). Dále mohou být použité ke spalování v cementárnách či jiných energetických zařízeních.

Při hodnocení ekonomické a ekologické efektivity využití odpadů v energetice v této práci a při výpočtech v nástroji NERUDA obecně je uvažováno zařízení MBÚ prvního typu s následnou produkcí TAP a jeho spalování v monoblocích a spalování v zařízeních, které disponují fluidním kotlem, viz kapitola 4 Schéma uvažovaných zařízení MBÚ je na obr. 6.



*Obr. 6 Schéma MBÚ uvažovaných v nástroji NERUDA*

V současnosti se také vyskytují zařízení, ve kterých neprobíhá stabilizace frakce odcházející na skládku. Taková zařízení jsou prostými mechanickými úpravami (MÚ), která pouze „vytřídí“ využitelné a výhřevné složky a zbytek putuje bez jakékoliv úpravy na skládky. Toto zařízení je ekonomicky výhodnější, protože nedochází k energeticky náročné stabilizaci a dochází k úsporám investic. Nestabilizovaná frakce na skládce dále podléhá rozkladům za vzniku skládkovacího plynu, který má negativní efekt na tvorbu skleníkových plynů, jak bude ukázáno v kapitole 4.4. Bilanční schéma MÚ je uvedeno na obr. 7.



Obr. 7 Schéma MÚ

### 1.2.3 Energetické využití

V současných podmínkách ČR je energetické využívání odpadů ekonomicky horší variantou ke stále levnému skládkování. Původce odpadů není ekonomicky motivován k šetrným způsobům nakládání s odpadem. To souvisí především se zdroji. Je však skutečností, že se situace v této oblasti i v úrovni lokální a krajské zlepšuje, viz POH ČR i jednotlivých krajů, kde se již vyskytuje celá řada možných variant umístění zařízení EVO. Tomuto nahrává také již zmiňovaná novela zákona o odpadech.

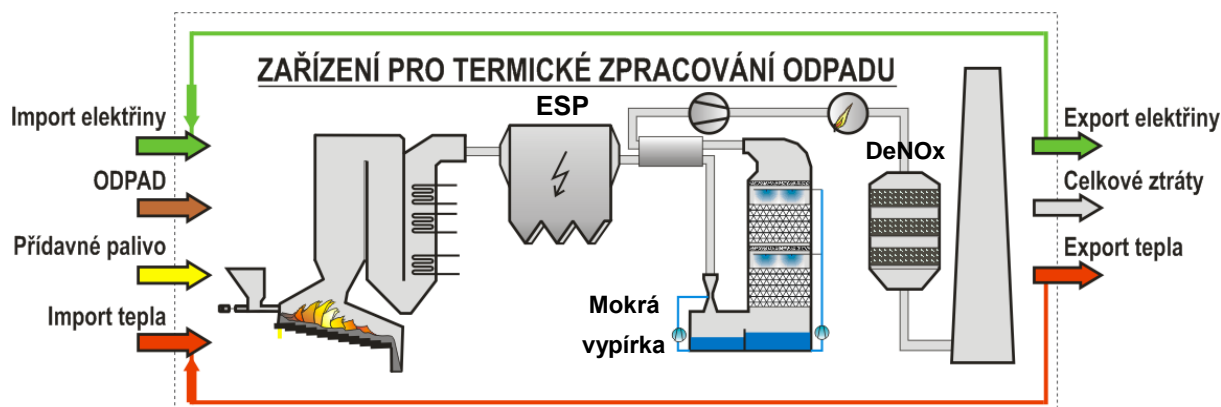
Aby spalovna mohla být považována za zařízení EVO, musí splnit podmínku energetické účinnosti R1 (R1 faktor, angl. energy efficiency), která je jedním z hlavních výrobních indikátorů u zařízení EVO. Je to parametr, který je označován jako účinnost, ale toto označení je mírně zavádějící. Tato veličina je bezrozměrné kritérium, které za určitých okolností a v důsledku dosazování v tzv. ekvivalentních jednotkách může přesahovat hodnotu 1, viz [19]. Výpočet energetické účinnosti probíhá dle postupů uvedených v příloze č. 12 zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech a změně některých dalších zákonů [8]. V návrhu novely zákona o odpadech je výpočet uveden v příloze č. 6 [9]. Tento postup je také zapsán v evropské směrnici 2008/98/ES [7]. Vzorec pro výpočet R1 dle předešlých právních norem je uveden v rovnici (1):

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 * (E_w + E_i)} \quad (1)$$

Kde:

- $E_p$  se rozumí roční množství vyrobené energie ve formě tepla nebo elektřiny. Vypočítá se tak, že se energie ve formě elektřiny vynásobí hodnotou 2,6 a teplo vyrobené pro komerční využití hodnotou 1,1 (GJ/r).
- $E_f$  se rozumí roční energetický vstup do systému z paliv přispívajících k výrobě páry (GJ/r).
- $E_w$  se rozumí roční množství energie obsažené ve zpracovávaných odpadech vypočítané za použití nižší čisté výhřevnosti odpadů (GJ/r).
- $E_i$  se rozumí roční dodaná energie bez  $E_w$  a  $E_f$  (GJ/r). 0,97 je činitelem energetických ztrát v důsledku vzniklého popela a vyzařování.

Koncepce zařízení pro termické využití odpadů se v podstatě shodují. Spalovny sestávají z termické části, bloku využití uvolněného tepla a systému čištění vzniklých spalin. Na obr. 8 jsou uvedeny základní energetické vstupy a výstupy zařízení EVO. Dále bývá technologie vybavena zařízeními pro skladování, manipulaci a přípravu odpadu a pro nakládání s tuhými a kapalnými produkty spalování [20]. Nejlepší možné dostupné technologie (BAT – Best Available Techniques), doporučení a podmínky pro zařízení EVO jsou souhrnně sepsány v obsáhlém referenčním dokumentu tzv. BREF [21].



**Obr. 8 Zjednodušené schéma hlavních energetických vstupů a výstupů v zařízení EVO**

Využití tepla spalin je u většiny spaloven uskutečněno v kotli na odpadní teplo (Heat Recovery Steam Generator – HRSG), kde je vyráběna přehřátá pára. Dle dokumentu BREF [21] se typické parametry vyráběné páry pohybují v rozmezí tlaku 4 až 4,5 MPa a teploty 380 až 420 °C. Pro použití zvýšených parametrů páry (např.: tlak 6 MPa) jsou zapotřebí náročná investiční opatření z důvodu korozní ochrany. Vliv zvýšených parametrů na produkci energií analyzoval například Pavlas et al. v [22].

Přehřátá pára je následně využita v kogeneračním systému výroby elektřiny a tepla. Produkce elektřiny může být dle požadavků provozovatele provedena pomocí protitlaké (PT), nebo kondenzační odběrové turbíny (KOT). Současné technologie potřebují importovanou energii pouze pro najíždění a odstavování spalovny z provozu nebo při vzniku nouzových provozních situací. Export tepla je odváděn za PT, nebo z odběru KOT a to buď v horké vodě, nebo v páře.

Díky podmínce minimálního exportu energie 1,9 MWh/t dle BREF [21] je vyžadována efektivní dodávka tepla. Zařízení EVO by mělo být umístěno v lokalitě, kde může využívat

nápojení na síť centrálního zásobování teplem (CZT). Pokud tomu tak není, tak musí zařízení orientovaná na výrobu elektřiny dosáhnout minimální výroby elektřiny v rozsahu 0,4 až 0,65 MWh/t. Hodnocení účinnosti výroby energií a dalších provozních parametrů v evropských spalovnách provedl a publikoval Reimann v [23]. Zařízení EVO rozdělil do tří skupin a určil u nich průměrné účinnosti výroby energií:

- Orientace na výrobu tepla – bez výroby elektřiny, účinnosti výroby tepla 77 %,
- Orientace na výrobu elektřiny – účinnost výroby elektřiny 21 %, účinnost výroby tepla 5 %
- KVET - účinnost výroby elektřiny 15 %, účinnost výroby tepla 37 %.

Souhrnný přehled o technologiích zařízení EVO byl publikován například v [24]. Více informací a podrobnější rozbor jednotlivých subsystémů z technologického hlediska bude uveden v kapitole 3.3, která se zabývá technicko-ekonomickými modely zařízení EVO.

V rámci ČR jsou v současnosti provozovány čtyři spalovny komunálních odpadů. Jedná se o moderní systémy, které zpracovávají odpad bezpečným a k životnímu prostředí šetrným způsobem.

## **2 CÍLE PRÁCE V NÁVAZNOSTI NA KOMPLEXNÍ SYSTÉMOVÉ ŘEŠENÍ**

V úvodu bylo zmíněno, že modely a následné výpočty popsané v této práci jsou součástí unikátního komplexního systému, který byl vytvořen a je zdokonalován na pracovišti ÚPI v „Sekci energetických systémů a simulačních výpočtů“. V této kapitole je popsáno, jakou má nástroj *NERUDA* strukturu, jak je koncipován jakými činnostmi do něj přispěl autor. Na závěr kapitoly jsou sepsány cíle práce. Tyto výzkumné činnosti budou v dalších částech dizertační práce popsány podrobně.

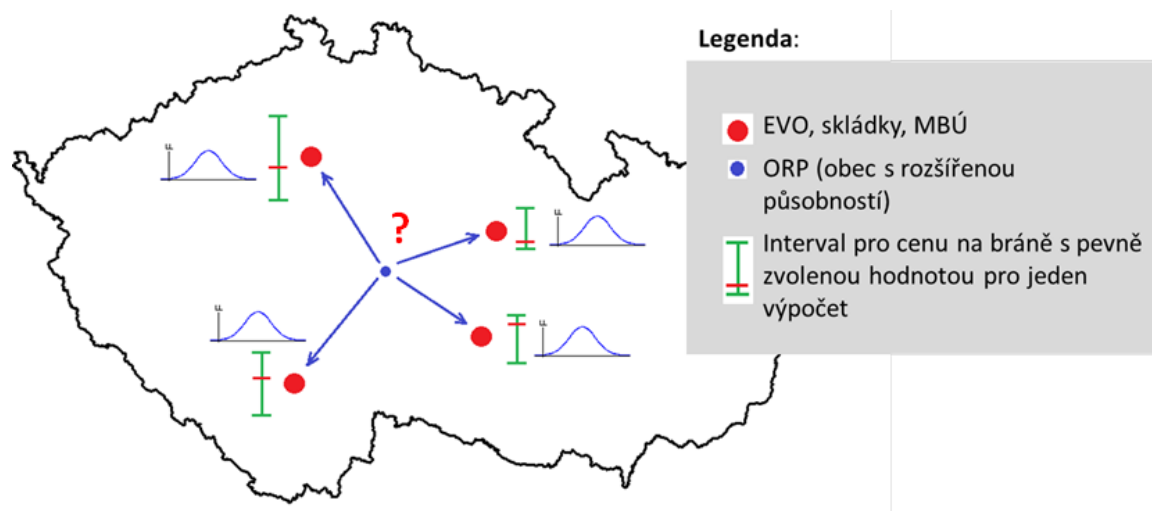
### **2.1 MODULÁRNÍ SYSTÉM NÁSTROJE *NERUDA***

Systém *NERUDA* je označení pro logistickou transportní svozovou úlohu pro simulaci toku odpadu na vymezeném území. *NERUDA* byl v prvotní fázi vyvíjen jako bezejmenný nástroj pro podporu výstavby zařízení *EVO* a výsledky byly publikovány v [25]. Později se rozrostl v rozsáhlý systém popisující odpadové hospodářství (OH) jako celek a představen byl v [26]. Vzhledem k obecně složitým vazbám v oblasti OH se pak jedná o komplexní úlohu – intuici obtížně řešitelnou. Oddělené posuzování jednotlivých projektů vytržených z kontextu okolí bez respektování vzájemných interakcí mezi projekty může vést k chybným závěrům a nerealistickým výstupům z úlohy. V takové situaci je nutné disponovat sofistikovaným výpočtovým nástrojem, který umožňuje simulovat toky odpadu při zahrnutí konkurenčních podmínek trhu. *NERUDA* tak dává do souvislosti tyto otázky a problémy [27]:

- Návrh vhodné lokality pro výstavbu zařízení a jejich optimální kapacita.
- Popis toku odpadu (materiálu) v rámci sledovaného území.
- Podpora návrhu logistického řetězce (svozová vozidla, překládací stanice, silniční a železniční doprava)
- Hodnocení atraktivity záměrů – dostupnost odpadu a očekávaná cena za jeho zpracování.
- Podpora zavádění legislativních opatření.

Potřebnost pokročilého nástroje, matematické modely a práce na obdobné téma v oblasti dodavatelských řetězců a jejich využití v OH a energetice byly podrobně představeny Šomplákem v [28]. S cílem ukázat, že toto téma je stále aktuální je zde uveden přehled vybraných prací, které byly publikovány v poslední době. Například Imanirad et. al. v [29] používá algoritmus svatojánských mušek pro generování nejistot při řešení úloh plánování v OH. V současnosti se stále více do popředí zájmu v optimalizaci OH, i procesů jako takových, dostává kromě ekonomického hlediska i hledisko ekologické. Martinez-Sanchez et. al. [30] využívá v optimalizaci strategie OH minimalizaci externích nákladů, které se skládají z řešení následků emisí z nakládání s odpady. Xu et. al. v [31] a Mahajan s Vakhariou v [32] pak představují využití řešení reverzního dodavatelského řetězce pro optimalizaci nákladů na zpracování odpadů společně s minimalizací emisí CO<sub>2</sub>. Jak bude představeno dále v této kapitole a následně podrobně v kapitole 4, tak i *NERUDA* reaguje na současný trend „ekologické optimalizace“ přidáním modulu, který se věnuje dopadu na životní prostředí. V kontextu výše uvedeného přehledu tedy *NERUDA* reprezentuje pokročilý systém pro řešení optimalizačních úloh v OH, který je stále aktuální.

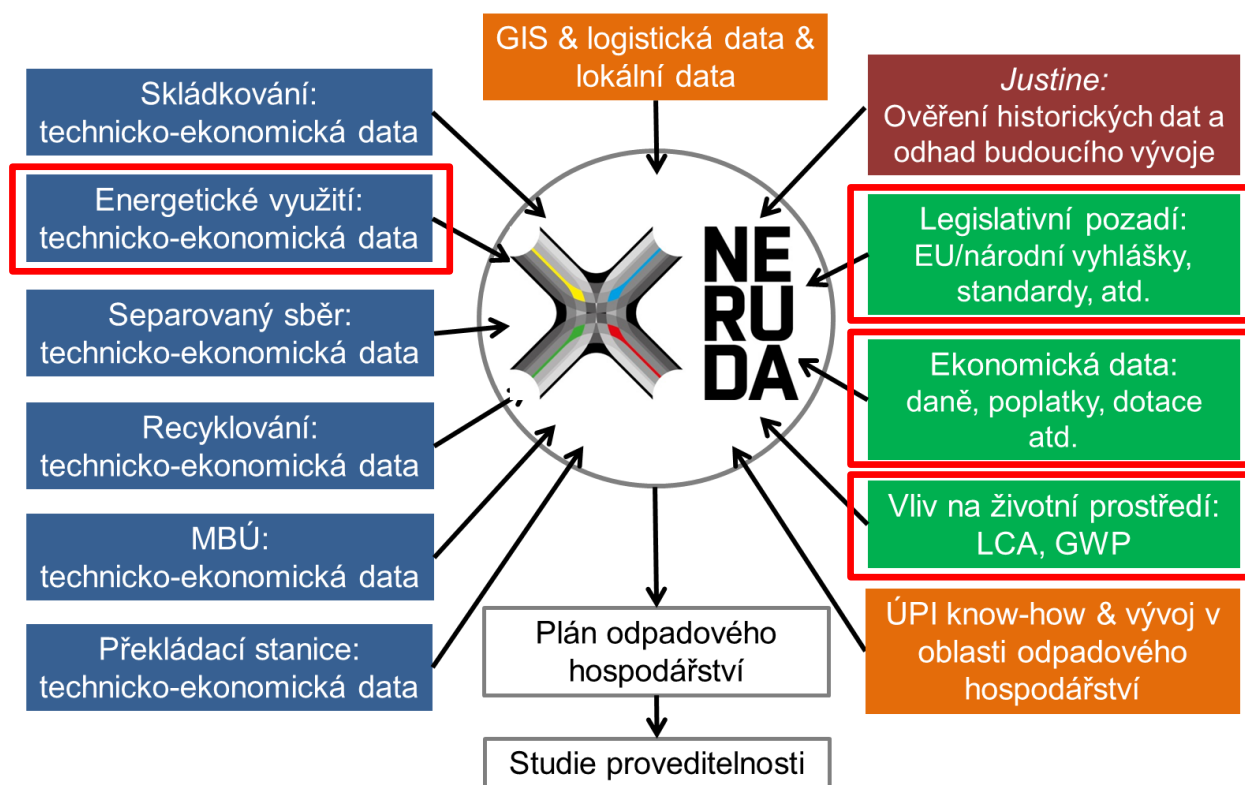
Hlavní idea nástroje NERUDA vychází z následujícího jednoduchého principu: Vlastník odpadu (obec) se rozhoduje, jak s odpadem naloží, přičemž kritériem je dosažení nejnižších nákladů. Ty jsou dány cenou za zpracování v daném zařízení (tzv. cena na bráně, anglicky pak „gate-fee“) a cenou dopravy (resp. nezbytného logistického celku). Tato hlavní idea je spolu s podkladovou mapou ČR ilustrována na obr. 9, kde je vyobrazena mapa ČR s detailem na bázi obcí s rozšířenou působností (ORP). Území ČR je tedy rozděleno do 206 uzlů. Hrany grafu představují reálnou silniční síť mezi jednotlivými ORP [28].



**Obr. 9 Hlavní myšlenka výpočtového nástroje NERUDA [28]**

Výpočtové jádro nástroje je sestaveno v softwaru GAMS (software pro výpočet optimalizačních úloh) a čerpá z datových souborů, nebo jinak řečeno modulů, které tvoří komplexní systém pro popis OH. Modulární založení celé úlohy je pak zobrazeno na obr. 10. Moduly označené v červeném rámečku, jsou moduly, na kterých se velkou měrou podílel autor dizertační práce nebo byl přímo jejich autor. Konkrétně se jedná o následující:

- Příprava, hodnocení dat a tvorba T-E modelu EVO - hlavní autor.
- Analýza legislativního pozadí a jeho aplikace do T-E modelu může být rozdělena na tyto oblasti:
  - Provozní předpisy a omezení (např.: emisní limity, charakteristika spalovacího procesu) – spoluautor.
  - Účinnosti výroby energií, R1 faktor – hlavní autor.
  - Podporované zdroje energií – hlavní autor.
- Analýza ekonomických dat, tvorba modelů investičních a provozních nákladů – spoluautor.
- Popis vlivu na životní prostředí, určení vhodného kritéria a jeho implementace do nástroje NERUDA – hlavní autor.



**Obr. 10 Komplexní systém logistické síťové úlohy NERUDA**

Moduly týkající se technologií pro zpracování odpadů jsou na obr. 10 uvedeny na levé straně. Pracoviště ÚPI v současnosti disponuje celou řadou provozních a ekonomických dat získaných od spolupracujících firem (např.: ČEZ a.s., EVECO Brno, s.r.o., Pražské služby a.s., TERMIZO a.s., Ernst & Young, s.r.o. a další). Z těchto dat vznikaly a vznikají jednodušší nebo složitější technicko-ekonomické modely, které mají za úkol poskytovat vstupy pro výpočetní část NERUDY v prostředí GAMSu. Hlavními výstupy z T-E modelů jsou ceny na bráně pro jednotlivá zařízení. Podle složitosti modelu je pak tato cena popsána buď konstantou (sklárky), nebo křivkou závislosti na zpracovatelské kapacitě (EVO, MBÚ, monobloky, překládací stanice). Podstatná část prací byla odvedena v rámci výzkumného projektu č. TE02000236 "Waste-to-Energy (WTE) Competence Centre" (WtECC). Například zařízení MBÚ se věnoval Kropáč v [33]. Práce Kropáče byly následně rozšířeny v [34]. Překládací stanice jako součást transportu odpadu byly řešeny Gregorem v [35].

Z technicko-ekonomických modelů byl první a nejrozsáhlejší model zařízení EVO. Na tomto modelu se největší mírou podílel právě autor této práce. Tento model byl interně nazván „Flexi“ model, představen v [36] a v této práci bude podrobně popsán v kapitole 3.3. Hlavním výstupem Flexi modelu je stanovení křivky závislosti ceny na bráně pro jednotlivé uvažované projekty při výpočtu v nástroji NERUDA.

Na pravé straně na obr. 10 jsou uvedeny moduly, které se využívají k formulování scénářů a podmínek výpočtu. Legislativní a ekonomická data se v mnoha případech prolínají. Jde především o legislativní omezení vycházející z evropských a následně i českých směrnic. Příkladem může být již zmiňovaný zákaz skládkování neupraveného odpadu od roku 2024, který je připravován v novele zákona o odpadech [9]. Dále pod tyto moduly spadají různé dotační programy a bonusy. Flexi model (ve své prvotní verzi) byl autorem například využit pro analýzu podpory výroby energie z EVO, která byla publikována v [37].



Jedním z modulů je i hodnocení dopadu na životní prostředí. Jak již bylo zmíněno, tak se v současné době klade čím dál větší důraz na snížení dopadu činnosti člověka na životní prostředí. Celý systém NERUDA je postaven na ekonomickém základu a nejvýhodnější řešení hledá minimalizací nákladů na zpracování odpadu. V současné době byl NERUDA rozšířen i o ekologické hledisko. K hodnocení se používá metodika LCA. Využití LCA je v současné době populární a frekventovaná metoda. J. Clearly v [38] uvádí porovnávací analýzu 20 LCA studií týkajících se OH z let 2002 až 2008. Z novějších je to například S. Tonilio [39], která využívá metodiku LCA k porovnání odhadu environmentálních dopadů zařízení EVO ve fázi plánování nového zařízení s reálným dopadem dopočítaným z provozních dat. V rámci LCA existuje celá řada kategorií ekologických zátěží. Mezi nejvíce zmiňované kategorie patří například globální oteplování (GWP z anglického Global Warming Potential), humánní toxicita (HTP), acidifikace (AP), úbytek stratosférického ozónu (ODP), tvorba fotooxidačních látek (POCP) a další [40]. Z porovnání výsledků některých studií (např.: [39], [41] a [42]) vyplývá, že parametr GWP je jedním z nejvýraznějších vlivů na životní prostředí z OH. V nástroji NERUDA je pak tento parametr využit jako ekologické kritérium. Tomuto nahrává i to, že se v této práci hodnotí využití odpadů v rámci OH a energetiky zároveň. Co se týče energetiky, jsou emise skleníkových plynů zásadním environmentálním ukazatelem. Podrobný popis přístupu a celkové implementace do systému NERUDA je součástí této dizertační práce a je uveden v kapitolách 4 a 5.

Velmi důležitou součástí celého systému NERUDA je i modul, který má za úkol získávat a sdružovat informace o současné produkci odpadu a následně odhadovat budoucí vývoj. Pro tento úkol byl na pracovišti ÚPI vytvořen nástroj nazvaný Justine. Justine je nástroj pro simulování a prognózování produkce odpadů a jejich dílčích hmotnostních toků, popř. složení na různém detailu územních celků (ČR, kraje, obce). Obecně lze tento nástroj použít na jakýkoliv problém, kde je prognózování postaveno na základě prostorově rozložených dat z několika minulých let. Tato data jsou navíc většinou nekompletní a neurčitá. V současnosti je Justine aplikována na produkci a složení odpadů v rámci ČR. Z výsledků Justine je v této práci například využito průměrné složení SKO pro ČR, viz tab. 4. Více informací o Justine je uvedeno v [43] a publikováno Zavíralovou například v [44].

Logistická data jsou pak výsledkem spolupráce ÚPI a Centra dopravního výzkumu (CDV). V tomto modulu se jedná o rozlišení způsobu dopravy (popelářská auta, kontejnery, soupravy, vlaky atd.), popis parametrů na jednotlivých cestách využívaných NERUDOU pro přepravu odpadu (hustota dopravy, převýšení, váhová omezení atd.) a následné stanovení ceny za přepravu odpadu. Více o tomto publikoval Gregor v [35].

Celý výpočtový systém NERUDA se všemi moduly představuje univerzální nástroj, který je vždy modifikován pro potřeby dané aplikace a s ohledem na konkrétní zadání. Může být aplikován na zcela jiné území a dokonce i jiný typ odpadu, popř. více druhů odpadů. Můžeme identifikovat několik potenciálních subjektů, které mohou mít přínos z aplikace nástroje [28].

- Státní správa, dotčená ministerstva – podpora klíčových rozhodnutí a analýzy související s přípravou strategických dokumentů a zákonů (SEK, POH apod.).
- Kraje, regiony, obce – podpora přípravy POH, studie proveditelnosti a analýza rizik investičních záměrů, optimalizace umístění a návrh kapacitního řešení překládacích stanic.

- Provozovatelé a investoři zařízení EVO – optimalizace kapacity zařízení z pohledu uplatnění tepla a dostupnosti odpadu, detailní svozové studie, optimalizace logistického řetězce s využitím silniční i železniční dopravy.

## 2.2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Práce se nazývá „Efektivní využití komunálních odpadů v energetice“. Základem pro toto téma tak je zkoumání problematiky zařízení EVO. Pod pojmem „efektivní“ v práci rozumíme:

- Energeticky efektivní – zařízení řídící se dle aktuálního BREF a splňující podmínku energetické účinnosti R1. Vhodně navržený režim výroby a exportu elektřiny a tepla.
- Ekonomicky efektivní – optimální nastavení ceny na bráně zařízení s ohledem na požadovanou návratnost projektu.
- S akceptovatelným dopadem na životní prostředí, resp. přispívající k ochraně životního prostředí (pozitivní dopad).

Protože jsou zařízení EVO kombinací energetického a odpadového zařízení, neobejde se efektivní využití odpadů v energetice bez optimálního návrhu těchto systémů v kontextu odpadového hospodářství. Práce tak kombinuje optimalizaci zařízení EVO v rámci energetiky (výroba elektřiny a tepla) a v rámci odpadového hospodářství (dostupnost odpadu a návrh vhodné zpracovatelské kapacity). Vyhodnocení je v základu prováděno v podmínkách celé ČR. Toto může být modifikováno pro potřeby jednotlivých regionů, mikroregionů i jednotlivých zařízení.

Protože je v současnosti stále více kladen důraz na ochranu životního prostředí, tak jsou cíle práce rozděleny do dvou větví. První větev je tvorba T-E modelů zařízení EVO a druhá je problematika environmentálních dopadů (EVO a další alternativní technologie). Mezi hlavní cíle v oblasti T-E modelů zařízení EVO patří:

- Seznámení se s provozními daty zařízení EVO a jejich zpracování.
- Vytvoření bilančních modelů existujících zařízení.
- Zobecnění modelu pro širokou škálu technologických uspořádání.
- Implementace ekonomického modelu.
- Vytvoření vhodného rozhraní pro obecný T-E model zařízení EVO, tak aby byl schopný generovat potřebné vstupní data pro úlohy v nástroji NERUDA.

V oblasti environmentální jsou cíle následující:

- Nalezení vhodného kritéria pro hodnocení dopadu EVO na životní prostředí v kontextu energetiky a odpadového hospodářství.
- Implementace tohoto kritéria do T-E modelu.
- Implementace ekologického hlediska do účelové funkce nástroje NERUDA.
- Generování vstupů vhodných pro hlavní výpočet softwaru NERUDA.

### 3 TECHNICKO-EKONOMICKÉ MODEL Y EVO

V předchozí části byla zmíněna výhodnost využití matematických modelů při plánování a provozu EVO v rámci optimalizační úlohy v nástroji NERUDA (ceny na bráně). Implementace matematických modelů jednotlivých částí zařízení vede k vytvoření technického modelu. Pro tvorbu technického bilančního modelu jsou pak stěžejní znalosti:

- kalorického obsahu paliva
- účinnosti jednotlivých technologických částí zařízení
- způsobu výroby a využití tepla
- vztahu výroby elektřiny a tepla.

Pokud je k takovému nástroji přidán ekonomický popis modelovaného zařízení, vznikne tím pak tzv. technicko-ekonomický model. Využití T-E modelů v praxi je pak provázáno s dalšími simulačními a optimalizačními nástroji. V předmětné oblasti EVO se pak T-E modely používají především pro hodnocení ekonomického efektu. Převážná většina parametrů vstupujících do modelů je proměnná v čase. Pro využití technicko-ekonomických modelů pro simulační a hlavně optimalizační nástroje využívající scénářové přístupy, je zapotřebí, aby model umožňoval vkládat a zpracovávat data s určitou časovou závislostí. Postupný vývoj T-E modelů v rámci dizertační práce vedl k vytvoření tzv. „Flexi“ modelu a je popsán v následujících kapitolách. Flexi model je pak možné využít právě pro scénářové úlohy, které jsou základem nástroje NERUDA.

Pro snadné využití vytvořených T-E modelů bylo přistoupeno k implementaci výpočtového modelu do prostředí MS Excel. Platforma MS Excel byla zvolena na základě následujících předností:

- v inženýrské praxi se jedná o jedno z nejrozšířenějších vývojových prostředí
- dostupnost a rozšířenost, z čehož vyplývá zkušenost a ochota budoucích uživatelů s ním pracovat
- jednoduchá tvorba vstupních a výstupních formulářů v podobě tabulkových „spreadsheetů“
- snadné zpracování výsledků pro následnou prezentaci do podoby tabulek a grafů
- snadné zpracování vstupních dat do formátu potřebného pro software GAMS, se kterým pracuje nástroj NERUDA.

Při implementaci modelů byly plně dodržovány zásady nutné pro pokročilé využití všech možností, které systém nabízí, což umožnilo v tomto prostředí vytvořit i takto komplexní modely. Jedná se zejména o využití programovacího prostředí Visual Basic for Applications (VBA).

Vývoj modelů vedl přes návrh technicko-ekonomických modelů konkrétních zařízení až k vytvoření obecného modelu Flexi. Základem byly dva modely zpracované pro stávající zařízení EVO v Liberci a Praze. Modely byly vytvořeny kombinací zpracování provozních dat s bilančními výpočty jednotlivých součástí provozu. Získané znalosti byly využity pro tvorbu obecného bilančního modelu.

### 3.1 MODEL VÝROBY V PROVOZU *TERMIZO*

Pro společnost *TERMIZO*, a.s. (dále jen *TERMIZO*) byl zhotoven simulační model, který slouží jako podpůrný nástroj pro rozhodování o volbě vhodného provozního režimu s ohledem na možnost využití vyrobeného tepla.

#### 3.1.1 Popis technologie *TERMIZO*

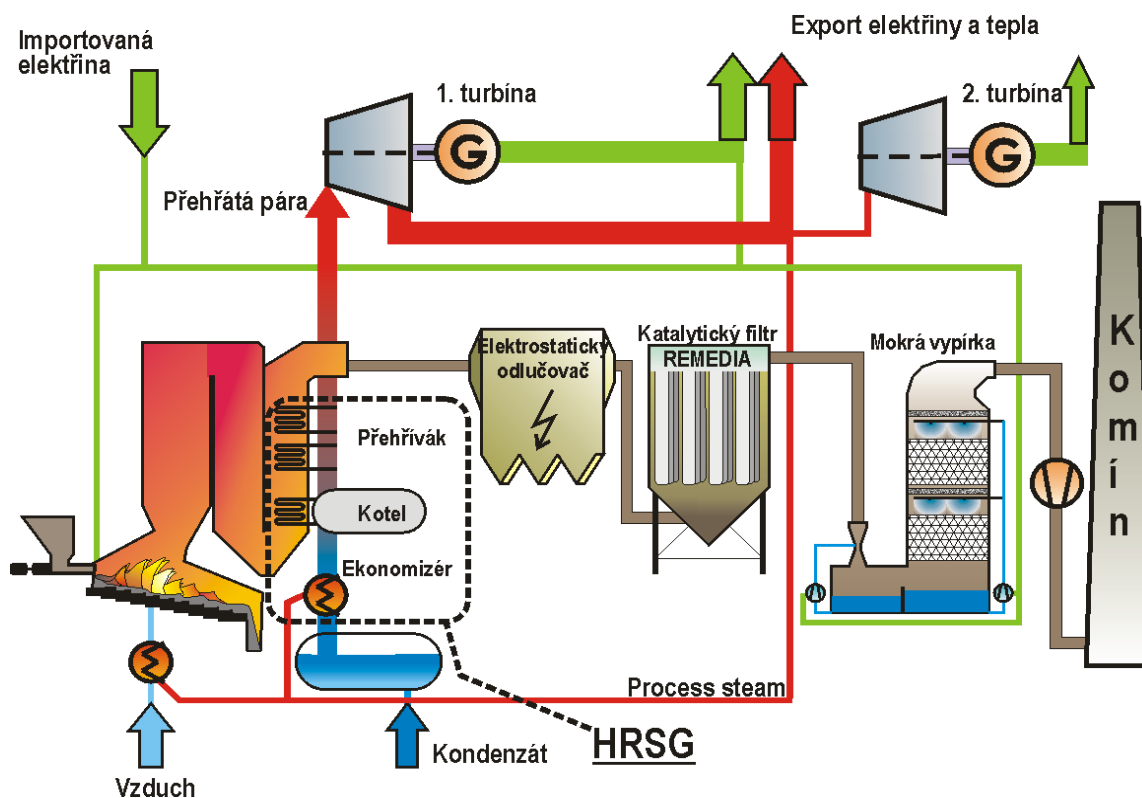
Spalovna v Liberci má kapacitu 96 kt/r SKO a je svážen z měst Liberec, Jablonec nad Nisou a okolí. V současnosti se neuvažuje o navýšení kapacity jednotky.

Zařízení sestává z jedné technologické linky s dávkováním odpadu, které je závislé na výhřevnosti a pohybuje se v rozmezí 6 až 18 t/h. Odpad je spalován na roštovém ohništi, které s parním utilizačním kotlem tvoří jeden aparát. Primární spalovací vzduch je předehříván vlastní párou na teplotu 140 až 160 °C a zaváděn pod rošt spalovací komory. Sekundární vzduch není předehříván a je zaváděn do oblasti dohořívací zóny. Přibližně 20 až 30 % spalin je za elektrostatickým odlučovačem odvedeno zpět do spalovací komory ve formě recyklu spalin [45].

Parní kotel je napájen chemicky upravenou (demineralizovanou) vodou ze sousední teplárny. Voda je ve vlastním provozu dále předehřívána na teplotu cca 115 °C, s touto teplotou napájecí voda vstupuje do parního kotle. Výstupem je pára o jmenovitém průtoku 35 t/h, teplotě 400 °C a tlaku 4,1 MPa (středotlaká pára). Tato pára je primárně využita k výrobě elektrické energie v protitlakové turbíně. Z prvního turbínového stupně odchází pára o teplotě 270 °C a tlaku 1,1 MPa (nizkotlaká pára). Tato pára může být dále využita v systému centrálního zásobování teplem (teplárnou) a k technologickým účelům ve spalovně (předehřev spalovacího vzduchu, ohřev kondenzátu, ohřev spalin). V roce 2010 byl uveden do provozu 2. turbínový stupeň, viz obr. 11. Toto opatření umožňuje zachovat maximální zpracovatelský výkon zařízení i při nižších nárocích odběratele otopné páry (zejména v letním období). Výkon prvního turbínového stupně je 2,5 MW a výkon druhého je pak závislý na množství páry dodávané do teplárny. V případě, že o teplo není ze strany teplárny zájem, může být nizkotlaká pára dále využita k výrobě další elektrické energie (čím větší dodávka do teplárny tím menší výkon turbíny) a pohybuje se v rozmezí 125 – 985 kW. Nízko-potenciální odchozí pára (200 kPa, 210 °C) je využita k předehřevu vratného kondenzátu a odplynění. Může být rovněž dále využívána k vytápění budovy spalovny, případně mařena ve vzduchovém chladiči [45].

Zařízení pracuje v kogeneračním režimu a je umístěno v těsné blízkosti teplárny, která zajišťuje odběr tepla a elektrické energie. Spalování SKO substituuje topný olej, který je základním médiem dané teplovodní soustavy. Roční dodávka tepelné energie je cca 720 000 GJ/r [45].

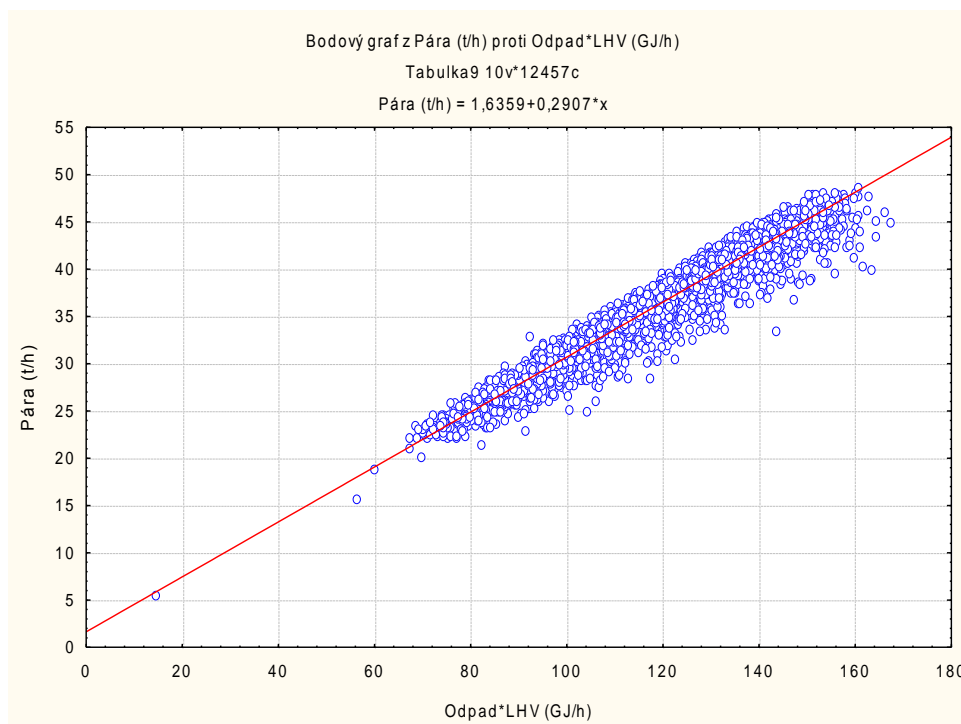
Systém čištění spalin, viz obr. 11, lze charakterizovat jako čtyřstupňový s průtokem spalných plynů přibližně 60000 m<sup>3</sup>/h. V prvním stupni probíhá snižování emisí oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) selektivní nekatalytickou redukcí (SNCR). Druhým stupněm čištění je snížení emisí tuhých znečišťujících látek (TZL) s obsahem toxických kovů v elektrostatickém odlučovači. Ve třetím stupni probíhá primární redukce emisí organických látek typu PCCD/F, užitím technologie REMEDIA D/F<sup>TM</sup>. Čtvrtým stupněm je redukce anorganických látek fyzikálně-chemickou absorpcí v bloku mokré vypírky spalin [45].



Obr. 11 Schéma spalovny v Liberci

### 3.1.2 Technicko-ekonomický model TERMIZO

V provozu TERMIZO byla v roce 2010 zprovozněna druhá turbína a vzduchový chladič. Zařízení tak může lépe reagovat na požadavky po dodávce tepla a při případném snížení odběru tepla do CZT vyrábět z přebytečné páry elektrickou energii. Simulační model umožňuje popsat vztah výroby tepla a výroby elektřiny při měnícím se množství zpracovaného odpadu, jeho výhřevnosti a dodávky tepla do CZT. Při tvorbě modelu se vycházelo především z provozních dat, které byly zpracovány pomocí nástrojů matematické statistiky. Firma TERMIZO poskytla soubor 15minutových dat ze dvou let provozu. Tato data byla zpracována a vznikly tak tzv. grey-box modely jednotlivých uzlů provozu, více uvedeno v [46]. Grey-box modely jsou modely fyzikálních systémů se známou strukturou obsahující neznámé parametry, které jsou získávány z reálného systému. Na obr. 12 je uveden příklad regresní funkce pro výpočet vyráběného množství páry.



**Obr. 12 Regresní funkce pro výpočet množství páry [46]**

Jednotlivé uzly byly následně propojeny, a tím vznikl celkový model technologie. Propojení bylo namodelováno na základě bilančních výpočtů. Na základě hodnot tří vstupních parametrů simulační model vypočítává hmotnostní toky hlavními technologickými uzly, provozní a výrobní ukazatele (výrobu elektřiny, vlastní spotřebu elektřiny, atd.) a další nezbytné parametry pro monitoring procesu. Pro vyhodnocení ekonomického efektu různé kombinace dodávky tepla, výroby elektřiny a zpracovaného množství odpadu pak byl model doplněn o ekonomické parametry. Pro uvedené účely postačuje jednoduchý ekonomický model, který zahrnuje:

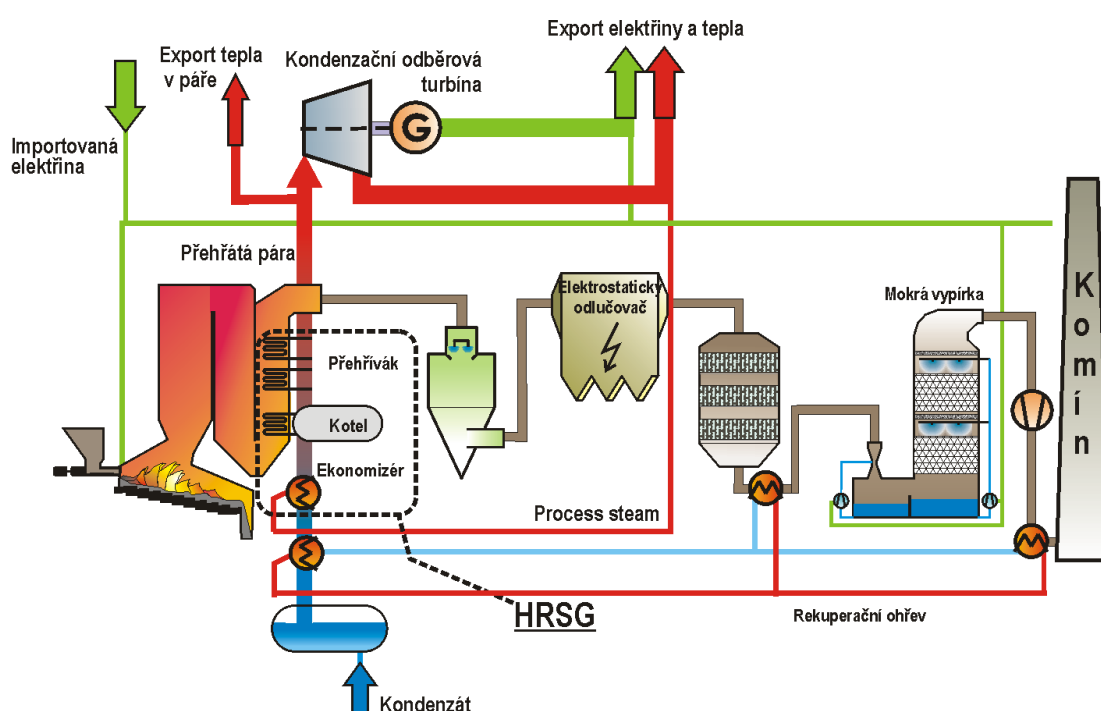
- příjem za zpracování odpadu
- příjem za prodej elektřiny a tepla
- příjem za podporu elektřiny z kogenerace a z DZE
- náklady na demi-vodu
- náklady na chemikálie.

Jak již bylo uvedeno, model byl implementován v prostředí MS Excel s využitím programovacího jazyka VBA, což bylo předmětem práce autora. Uživatelské prostředí je rozděleno na dvě části – schéma zařízení s hlavními provozními ukazateli (obr. 13) a detailní přehled všech provozních a ekonomických parametrů. První část, tedy schéma, je jednoduchým a přehledným nástrojem pro vizualizaci technologického uspořádání, do kterého se zobrazují toky hmotnosti a energie. Slouží pro snadnou orientaci mezi jednotlivými uzly a ke grafickému přiřazení vypočtených parametrů k odpovídajícím proudům v technologii. Druhá část je již podrobnější nástroj, který slouží pro výpočet jak provozních parametrů, tak navazujících ekonomických parametrů. Rozhraní tohoto listu je přizpůsobeno pro výpočet dvou provozních stavů a pro rychlé porovnání jejich ekonomických efektů.



Zařízení je napojeno na síť centrálního zásobování teplem (CZT) s roční dodávkou cca 1 000 TJ tepla. Od roku 2010, kdy byla zapojena kondenzační odběrová turbína, splňuje zařízení veškeré požadavky na energetické využívání odpadů a je navíc schopné využít svoji kapacitu celoročně (dříve při nedostatečném odbytu tepla musela být zpracovatelská kapacita snižována a zařízení nemohlo plnit svoji hlavní funkci). Parametry turbíny jsou: maximální výkon 18 MWe, hltnost 120 t/h, teplota páry 235 °C, maximální tlak na turbíně 1,22 MPa, kondenzační tlak 15 kPa, neregulovaný odběr: 6,6 bar, 55,4 t/h [48].

Systém čištění spalin sestává ze selektivní nekatalytické redukce (snižování množství  $\text{NO}_x$  nástríkem amoniakálního roztoku o množství cca 200 kg/h na linku), rozprašovací sušárny (likvidace odpadní vody), elektrostatických odlučovačů (ESP, odstranění tuhých znečišťujících látek (TZL), reaktoru DeNO<sub>x</sub>/DeDIOX (odstraňování  $\text{NO}_x$  a dioxinů a furanů) a mokré vypírky, viz obr. 14. Každá spalovací linka je vybavena samostatným systémem čištění spalin [48].



Obr. 14 Schéma spalovny v Praze

### 3.2.2 Technicko-ekonomický model ZEVO Malešice

Rozdíl od modelu výroby v TERMIZO je zde v tom, že tento model je vyhotoven převážně na základě bilančních rovnic a nikoli provozních dat. Vznikl tak tzv. white-box model. Takovýto model je založen výhradně na teoretických znalostech fyzikálních procesů. K tomuto bylo přistoupeno z důvodu, že v době zpracování byl v ZEVO Malešice používán původní systém archivace dat, který neumožňoval export dle potřeb. Například u spalovací komory byla určena závislost produkce spalin ( $m_N^3/h$ ) na množství spalovaného odpadu (t/h), jeho výhřevnosti (GJ/t) a přebytku kyslíku v suchých spalinách (rovnice (2)) použitím nasimulovaných dat spalování odpadů v softwaru W2E, vyvinutém na pracovišti autora:



$$FGFlow = WasteFlow * (a + b * LHV + c * O_2 + d * LHV^2 + f * O_2^2 + g * LHV^3 + h * O_2^3 + i * LHV + j * LHV^2 * O_2 + LHV * O_2^2) \quad (2)$$

Kde:  $a = 173.2$ ;  $b = 612.1$ ;  $c = 362.8$ ;  $d = -47.2$ ;  $f = -33.0$ ;  $g = 1.8$ ;

$h = 2.1$ ;  $i = -25.3$ ;  $j = 1.2$ ;  $k = 2.1$

Na rozdíl od předchozího modelu má model zařízení ZEVO Malešice více vstupních parametrů, které umožňují důkladnější nastavení simulovaného provozního stavu. Je možné nastavit způsob využití tepla jako dodávku do CZT, vlastní využití nebo prodej ostré páry. Dále je také nastavitelný bypass turbíny. Tyto možnosti jsou zabudovány pro přesný popis využití tepla v zařízení, které má značný vliv na ekonomiku provozu. Co se týká ekonomického modelu je zde použit obdobný jednoduchý model jako v případě modelu spalovny Termizo Liberec. Celý technicko-ekonomický model je potom opět vyhotoven v prostředí MS Excel, viz příloha č. 1.

Posun od předchozího modelu je ve způsobu simulace provozu v průběhu určitého časového úseku. Celý model je implementován jako jedna funkce a ta je potom využita pro simulaci denního resp. ročního provozu s proměnnými hodinovými resp. měsíčními parametry (viz příloha č. 2). Toto opatření tedy umožňuje využití modelu pro predikci (např.: způsob využití tepla v návaznosti na ekonomiku zařízení) a jednoduchou optimalizaci provozu.

Model ZEVO při porovnání s provozními daty vykazuje menší přesnost a větší rozdíly než model předchozí sestavený převážně z provozních dat, avšak pro potřeby simulace různých provozních stavů je dostačující. Vzhledem k účelu modelu je většina parametrů zařízení nastavena přímo v kódu a to neumožňuje využití modelu pro jiné zařízení než ZEVO Malešice.

Bilanční model ZEVO Malešice byl následně využit pro průmyslové zakázky výpočtu provozních parametrů. První byla v roce 2014 a jednalo se o výpočet množství elektřiny a tepla z KVET a poměrné úspory primární energie za období roku 2013. Druhou byl odborný posudek možnosti navýšení výroby a dodávky elektřiny v závislosti na zvýšené roční zpracovatelské kapacitě ZEVO Malešice a výpočet energetické účinnosti R1 (rok 2017).

Výpočet probíhal pro 3 roční zpracovatelské kapacity v hladinách:

- 320 000 t/r
- 360 000 t/r
- 400 000 t/r.

Pro všechny hladiny kapacitního řešení byly uvažovány dvě verze celkové roční dodávky tepla:

- 850 000 GJ/r
- 920 000 GJ/r.

Pro těchto 6 variant výpočtu byla stanovena dodávka elektřiny a dopočtena hodnota energetické účinnosti R1. Nakonec byla pro jednotlivá kapacitní řešení stanovena minimální dodávka tepla, která je potřeba pro splnění zákonných podmínek hodnoty energetické účinnosti R1.

K výpočtu byl použit nejen bilanční model (white-box model) vyvíjený autorem ve spolupráci ÚPI a ZEVO, ale k ověření také model pro denní plánování kombinované výroby elektřiny a tepla v provozu ZEVO Malešice (grey-box model). Tento model je také vyvíjen na pracovišti ÚPI, ale autor se na tomto modelu podílel pouze konzultačně a jeho popis přesahuje téma dizertační práce.

### **3.3 FLEXI MODEL**

Z důvodů nedostatků předchozích modelů a potřeby disponovat univerzálním nástrojem byl vyvinut tzv. „Flexi“ model. Účast na vývoji tohoto výpočtového nástroje byla a je podstatnou prací autora. Autor se převážně podílel na tvorbě technické části tohoto nástroje. Flexi model využívá zkušeností získaných při tvorbě modelů zařízení ZEVO a TERMIZO:

- implementace v prostředí MS Excel,
- oddělení vstupních dat od výpočtového jádra
- výpočtový algoritmus
- opakovatelnost výpočtu

a současně vylepšuje některé omezení předchozích modelů:

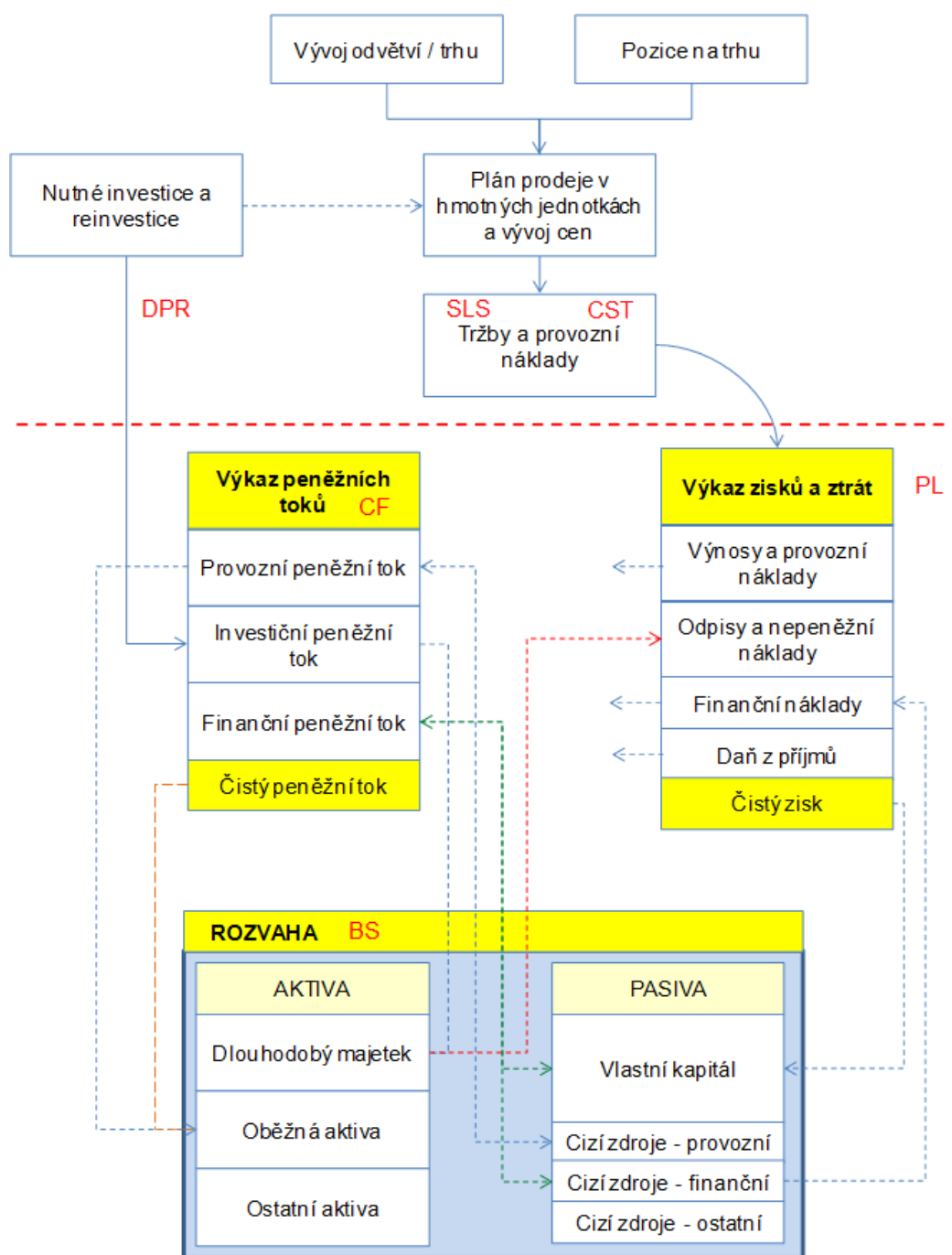
- obecný model
- potřeba změny většiny parametrů
- legislativní podmínky
- podrobný ekonomický model.

Tento technicko-ekonomický model byl vytvořen z důvodu potřeby obecného modelu, který by umožňoval hodnocení různých systémů a to především pro případy koncepčního plánování, kdy ještě nejsou známa konkrétní provozní data jednotlivých zařízení. Model je vytvořen na základě bilančních výpočtů, ale na rozdíl od předchůdců umožňuje širokou škálu nastavení technologie (tab. 2). Zjednodušené schéma uvažované zařízení EVO, podle kterého je sestaven T-E model se všemi jeho variantami je uveden v příloze č. 3.

**Tab. 2 Nastavitelné parametry Flexi modelu - příklad**

PROVOZNÍ ÚDAJ			Jednotka	Hodnota
Fond pracovní doby			h	8 000
Odpad	Výhřevnost		GJ/t	10,14
	Kapacita		kt/r	150
Kotel	Účinnost kotle		%	83,0
	Teplota napájecí vody		°C	129
	Tlak napájecí vody		MPa	4,9
	Teplota vyráběné páry		°C	400
	Tlak vyráběné páry		MPa	4,1
	Odkalový poměr		-	0,01
Turbína	Minimální průtok kondenzační částí (3.stupeň)		%	10
	Turbína 1. stupeň - protitlaká část	Tlak v 1. Odběru	MPa	1,1
		Termodynamická účinnost 1. stupně	-	0,77
		Mechanická účinnost 1. stupně	-	0,88
	Turbína 2. stupeň - protitlaká část	Tlak v 2. Odběru	MPa	0,5
		Termodynamická účinnost 2. stupně	-	0,87
		Mechanická účinnost 2. stupně	-	0,88
	Turbína 3. stupeň - kondenzační část	Tlak za 3. stupněm turbíny	MPa	0,01
		Termodynamická účinnost 3. stupně	-	0,78
		Mechanická účinnost 3. stupně	-	0,88
		Množství páry pro předeheřev	t/t odpadu	0,35
		Entalpie kondenzátu z LUVO	GJ/t	420
		Entalpie vratného kondenzátu po	GJ/t	420
Kondenzátor	Entalpie kondenzátu za kondenzátorem		GJ/t	147
Spotřeba energií	Měrná spotřeba elektřiny v kW/t odpadu		kW/t odpadu	124
	Importovaná elektřina		% vlastní	6
Ostatní parametry - zadávaní poměru, pouze	Obsah železného šrotu		kg/t odpadu	12
	Obsah popelovin ve vstupním odpadu		kg/t odpadu	300
	Spotřeba zemního plynu		MWh/t odpadu	0,028
	Spotřeba vody		m <sup>3</sup> /t odpadu	0,6

Tento model je pak propojením dílčích částí – bilance energie a hmoty, ekonomika - do jednotného uživatelského prostředí. Ekonomický model zahrnuje podrobné údaje o všech aspektech ekonomiky provozu EVO. Logická souvislost ekonomického popisu je patrná z následujícího schématu v obr. 15.



**Obr. 15** Ná vaznost finančních toků ve Flexi modelu

Ekonomický model obsahuje na jedné straně údaje o nákladových položkách:

- investice a reinvestice,
- náklady na provoz – nákup materiálu, chemikálií, vody, náhradních dílů, elektřiny, zemního plynu,
- náklady na dopravu,
- náklady na mzdy zaměstnanců,
- daně,
- atd.

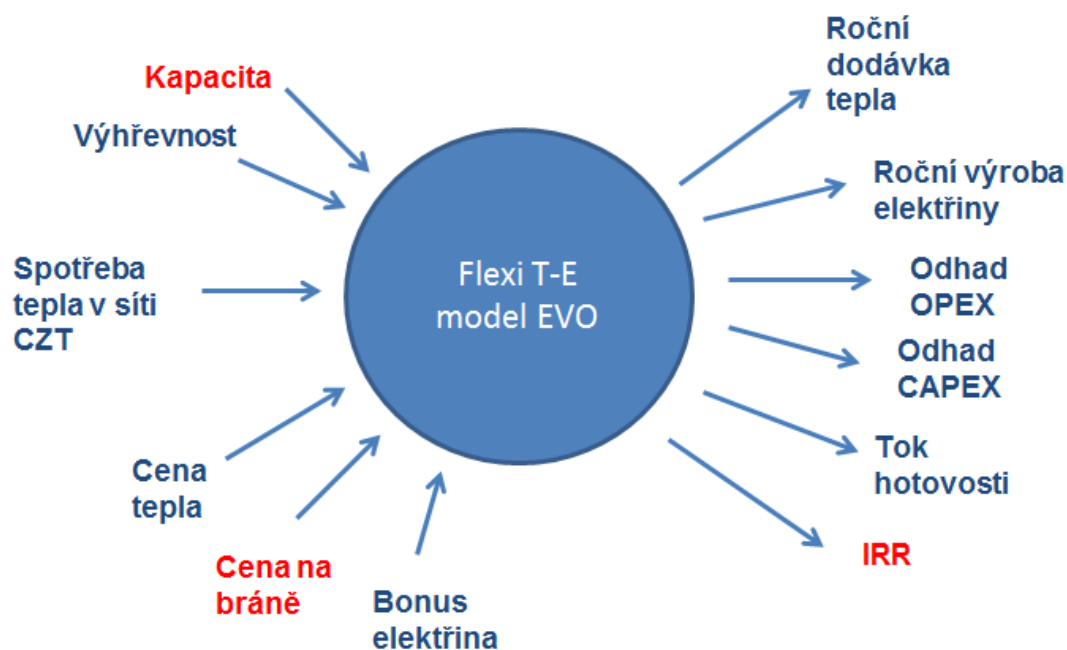
na druhé straně údaje o provozních ziscích:

- spálený odpad,
- prodej elektřiny,
- prodej tepla,
- příplatky k ceně elektřiny a tepla,
- prodej železného šrotu,
- případně další položky.

Technický model byl nejprve sestaven v prostředí Maple. Celý technicko-ekonomický Flexi model je potom obdobně jako předchozí implementován do prostředí MS Excel. K tomuto kroku bylo přistoupeno z důvodu zajištění přívětivého uživatelského rozhraní a snadné práce s výsledky a především kvůli snadnému propojení technického modelu s rozsáhlým ekonomickým modelem.

V rámci dizertační práce byl vytvářen a zdokonalován tento bilanční technický model jednotek EVO velkých i malých kapacit s cílem stanovit klíčové energetické ukazatele jako je například výroba elektřiny, dodávka tepla v horké vodě a páře nebo vlastní spotřeba energie. Dále byla řešena ekonomická stránka modelu zařízení EVO.

Ve spolupráci s firmou EVECO Brno, s.r.o. byly v rámci projektu WtECC stanoveny investiční náklady posuzovaných technologií. Na základě dlouhodobé spolupráce se stávajícími provozy spaloven v Praze (ZEVO Malešice – Pražské služby a.s.) a Liberci (TERMIZO a.s.) byl nalezen model údržby zařízení EVO. Tyto informace jsou dále využity k vytvoření komplexního technicko-ekonomického modelu jednotek EVO – Flexi modelu. Na obr. 16 jsou shrnuty klíčové vstupní a výstupní údaje, s kterými Flexi model pracuje. Nejdůležitější parametry jsou vyznačeny červeně. Prvním významným parametrem je vnitřní výnosové procento (IRR) [19], pomocí něhož je zpětně dopočítána cena na bráně, tzv. backsolving, který bude popsán níže. Výsledná cena na bráně, nebo lépe závislost ceny na bráně na kapacitě projektu tvoří stěžejní výstup z Flexi modelu a je následně využívána v softwaru NERUDA pro modelování konkurenčního prostředí v oblasti OH.



*Obr. 16 Shrnutí vstupů a výstupů Flexi modelu  
Pozn.: Červeně jsou vyznačeny nejdůležitější parametry*

### 3.3.1 Popis uživatelského rozhraní a základní funkce Flexi modelu

Uživatelské rozhraní sumarizuje hlavní informace o ekonomice projektu, vazbě mezi bilančními údaji, příjmy, náklady a výnosnosti projektu (vyjádřeno jako IRR). Rozhraní zahrnuje základní principy ekonomického hodnocení projektů. Celý model je implementován do prostředí MS Excel a výpočetní funkce jsou pak programovány v jazyce VBA, který je součástí Excelu a umožňuje pokročilou práci s listy, buňkami a makry. Celý sešit se skládá z 24 listů. První je list úvodní, na kterém jsou uvedeny základní informace o T-E modelu a poznámky k současné verzi. Další 4 listy jsou věnovány bilančnímu výpočtu a databázi lokalit. Ekonomickému modelu je věnováno 14 listů. Další listy jsou pak pro ostatní výpočty, které jsou popsány dále v textu (např.: analýza struktury výnosů, citlivostní analýza, výpočet ceny na bráně atd.).

Z pohledu pozdějších aplikací v nástroji NERUDA je klíčová úprava, která umožní zohlednění výpočtu ve scénářích. K tomu bylo zapotřebí:

- Sestavit pokročilé uživatelské rozhraní v prostředí MS Excel.
- Implementovat techniky pro scénářový přístup.

Veškerá práce s Flexi modelem probíhá prostřednictvím listu „Uživatelské rozhraní“:

1. Uživatelem je prostřednictvím rozbalovacího seznamu zvolena lokalita
2. Je nastavena požadovaná technologie (viz dále v kapitole 3.3.3) a kapacita zařízení
3. Jsou nastaveny další parametry, viz obr. 17 :
  - a. Cena tepla.
  - b. Počet zaměstnanců.
  - c. Cena za zpracování odpadu.

- d. Pokrytí investičních nákladů případnou dotací.
- e. Bonus DZE.
- f. Bonus OZE.
- g. Příplatek KVET.
- h. Hodnota inflace.

IRR		HLAVNÍ VSTUPY		Technologie		HLAVNÍ VÝSTUPY	
Výpočet		Kapacita	kt/rok	20.0		Počáteční investice (v tis. Kč), rok 2021	297,381
		Počet zaměstnanců (pouze pro malé kapacity)		17		Investiční dotace v %	0.0%
		Využití tepla v %				Investiční dotace (v tis. Kč)	0
		Investiční dotace v %		0.0%		Investice soukromého sektoru (v tis. Kč)	297,381
		Výnosové položky v cenách 2012			2025	Tržby roku 2022	94,517
		Zpracování odpadu		2500 Kč/t	3234,0166		
		Cena tepla		144 Kč/GJ			
		Podpora, příplatky scénář					
		Odpad příplatek nárůst do 2016					
		Bonus DZE		0 Kč/MWh		· roky	7
		Bonus OZE		690 Kč/MWh		Čistá současná hodnota při diskontní míře	110,287
		Příplatek KVET		140 Kč/MWh		Vnitřní výnosové procento za celou životn	16.00%
		inflace		2.00%			

**Obr. 17 Uživatelské rozhraní Flexi modelu**

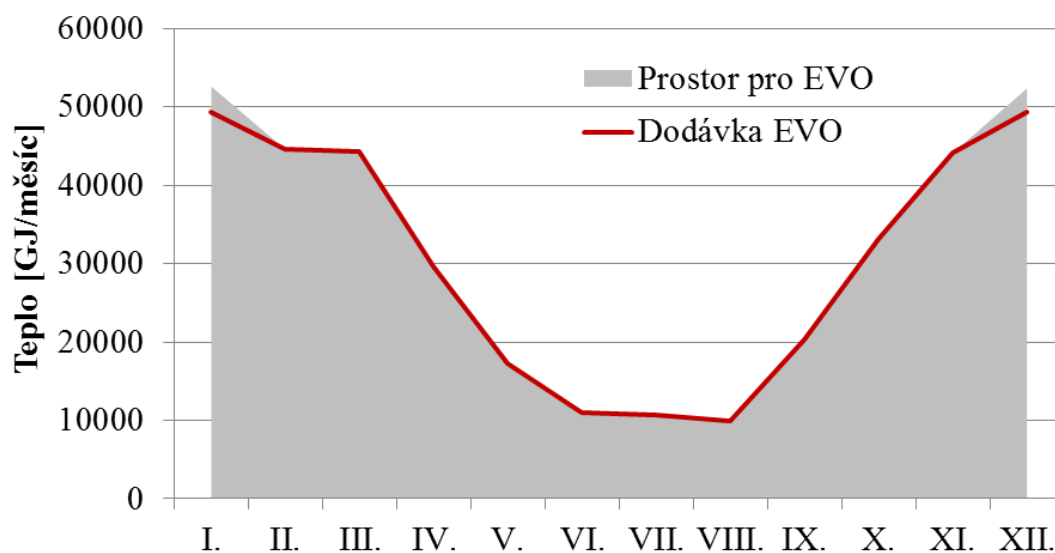
4. Po stisknutí příkazového tlačítka dojde k výpočtu technické části modelu v kódu VBA po jednotlivých měsících a výsledky důležité pro ekonomickou část modelu jsou vypsány na list „Vstupy“
5. Nakonec jsou na základě výstupů z technické části modelu vypočteny ekonomické ukazatele, jako např. IRR, časová návratnost nebo čistá současná hodnota projektu, které jsou vypsány na list „Assessment“ a pro kontrolu také do uživatelského rozhraní.

V dalších kapitolách budou postupně představeny jednotlivé možnosti využití a příklady konkrétních výsledků Flexi modelu, ať už se jedná o různé analýzy vlivů na ekonomiku, nebo příprava dat pro další výpočty pomocí softwaru NERUDA.

### 3.3.2 Analýza struktury nákladů a výnosů zařízení EVO

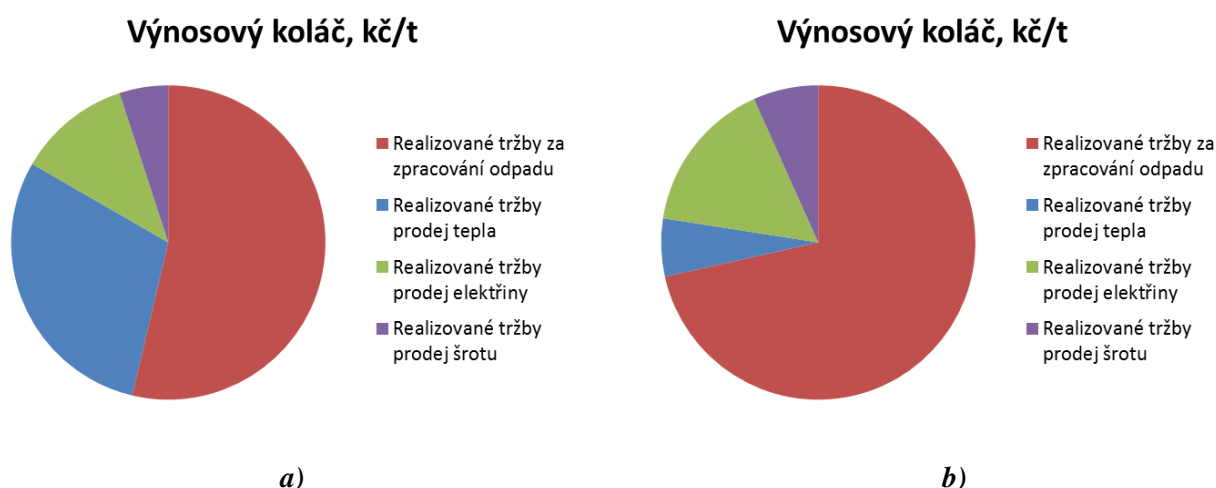
První z příkladů využití Flexi modelu je tzv. analýza struktury nákladů a výnosů zařízení na energetické využití odpadů (EVO). Pro její znázornění slouží vytvoření tzv. koláčů poměrných výnosů a nákladů vztažených na tunu zpracovaného odpadu. Uživatelské prostředí modelu umožňuje simulovat různé konfigurace technologií a vstupních parametrů tak, aby bylo možné ukázat jejich vliv na ekonomiku provozu zařízení v různých podmínkách.

Flexi model se skládá mimo jiné z databáze lokalit s různou velikostí sítě centrálního zásobování teplem (CZT) a tedy různou poptávkou po teple. Jako příklad je na obr. 18 uvedena síť CZT v lokalitě Jihlava. Tato síť je použita k ilustračnímu příkladu v kapitole 4 .



**Obr. 18 Příklad průběhu poptávky po teple v lokalitě Jihlava**

Prodej tepla je pro spalovnu druhým nejdůležitějším příjmem po výnosu za samotné zpracování odpadu, jak dokazuje následující obr. 19.



**Obr. 19 Struktura výnosů projektu EVO: a) projekt s dostatečnou kapacitou CZT; b) projekt s nedostatečnou CZT**

Na obr. 19 je znázorněna modelová situace pro projekt EVO s roční kapacitou 400 kt ve dvou případech. Pro obě možnosti je nastaven poplatek na bráně za zpracování odpadu na 1600 Kč/t. Příklad a) odpovídá lokalitě s poptávkou po teple (v síti CZT) převyšující maximální možnou dodávku ze zařízení (max. export 2450 TJ/r a více). V tomto případě zaujímá zisk z prodeje tepla téměř 1 třetinu celkových výnosů, které dělají 4600 Kč/t. Vnitřní výnosové procento (IRR) za celou životnost pro takovýto projekt je pak necelých 10 %.

Příklad b) je naopak záměrně volen z lokality z mnohem menší kapacitou sítě CZT a tedy i menší možností uplatnitelnosti tepla. Roční export ze spalovny je 370 TJ/r a dodává minimum energie v teple. V takovém případě klesne podíl zisků z prodeje tepla asi na 7 %. Celkové výnosy klesnou o nezrealizovaný příjem z prodeje tepla. Tuto ztrátu nevyváží ani zvýšená výroba a export elektřiny. Průměrné výnosy činí 3450 Kč/t. IRR



takového projektu klesne na hodnotu 1.2 %, což vykazuje nevhodnost takového projektu pro investora. Příklad jasně demonstruje význam dodávky tepla na realizovatelnost projektu EVO.

Pro oba případy byla zvolena obdobná technologie i kapacita projektu, proto jsou provozní náklady stejné a to 2500 Kč/t. Výsledný graf struktury nákladů je pak na obr. 20.



**Obr. 20 Struktura nákladů projektu EVO**

Pod pojmem „Služby“ z obr. 20 se skrývají náklady na opravy a údržbu, likvidaci odpadních vod, externí měření, ostraha, kamerové systémy, ale největší část zhruba 90 % zabírají náklady spojené se zpracováním rezidui (doprava, likvidace, skládkování). Pojem „Spotřeba materiálu a energií“ pak zahrnuje náklady na nákup elektřiny, zemního plynu, vody, náhradních dílů a v největší míře náklady na nákup chemikálií a materiálu. Do „Mzdové náklady“ pak spadají náklady na mzdy zaměstnanců plus odvody státu jako sociální a zdravotní pojištění.

### **3.3.3 Vliv velikosti a technologického uspořádání zařízení na strukturu nákladů a výnosů**

Pro jednoduchý rozbor závislosti výnosů a výdajů na velikosti zařízení, tedy roční zpracovatelské kapacitě, je uvažována pouze jedna lokalita. Dále je uvažováno, že poptávka po teple bude tak velká, že každá zvolená kapacita bude moct dodávat maximum tepelné energie. Při splnění těchto podmínek nemá velikost zařízení významný vliv na strukturu nákladů a výnosů. Ty budou podobné jako na obr. 19 a) a obr. 20. Lišit se bude pouze celková hodnota nákladů na tunu zpracovaného odpadu, která bude stoupat s klesající roční kapacitou, tzn. u větších zařízení sledujeme menší poměrné náklady na provoz.

Dalším bodem je ukázka vlivu použitých technologií v zařízení EVO na jeho ekonomiku. V zmíněném modelu Flexi figuruje několik variant přednastavených technologických uspořádání. Základní rozdělení je na technologie pro zařízení velkých (100 a více kt/r) a malých kapacit (10 až 50 kt/r). Dále rozlišujeme využití parní kondenzační odběrové turbíny nebo parní protitlaké turbíny. Poslední možností je nastavitelná technologie čištění spalin. Popis parametrů jednotlivých systémů čištění spalin probíhal ve spolupráci s firmou EVECO Brno a.s. V přehledu tedy Flexi model rozeznává:

- Velikost
  - Technologie středních a velkých kapacit
  - Technologie malých kapacit

- Turbína
  - Kondenzační odběrová
  - Protitlaká
- Čištění spalin
  - Technologie s využitím vápenného hydrátu
  - Technologie Remedie
  - Technologie s mokrou vypírkou.

V uživatelském rozhraní modelu jsou pak tyto možnosti reprezentovány jako technologie 1 až 14, kdy úvodních 5 jsou obecná původní nastavení, která jsou používána k vedlejším výpočtům a krátkodobým úpravám. Od technologie 6 výše jsou již pak nastavena natrvalo, a to:

- Tech 6 – kapacita 100+ kt/r, odběrová turb., vápenný hydrát
- Tech 7 – kapacita 100+ kt/r, odběrová turb., Remedie
- Tech 8 – kapacita 100+ kt/r, odběrová turb., mokrá vypírka
- Tech 9 – kapacita 10 až 50 kt/r, protitlaká turb., vápenný hydrát
- Tech 10 – kapacita 10 až 50 kt/r, protitlaká turb., Remedie
- Tech 11 – kapacita 10 až 50 kt/r, protitlaká turb., mokrá vypírka
- Tech 12 – kapacita 100+ kt/r, protitlaká turb., vápenný hydrát
- Tech 13 – kapacita 100+ kt/r, protitlaká turb., Remedie
- Tech 14 – kapacita 100+ kt/r, protitlaká turb., mokrá vypírka

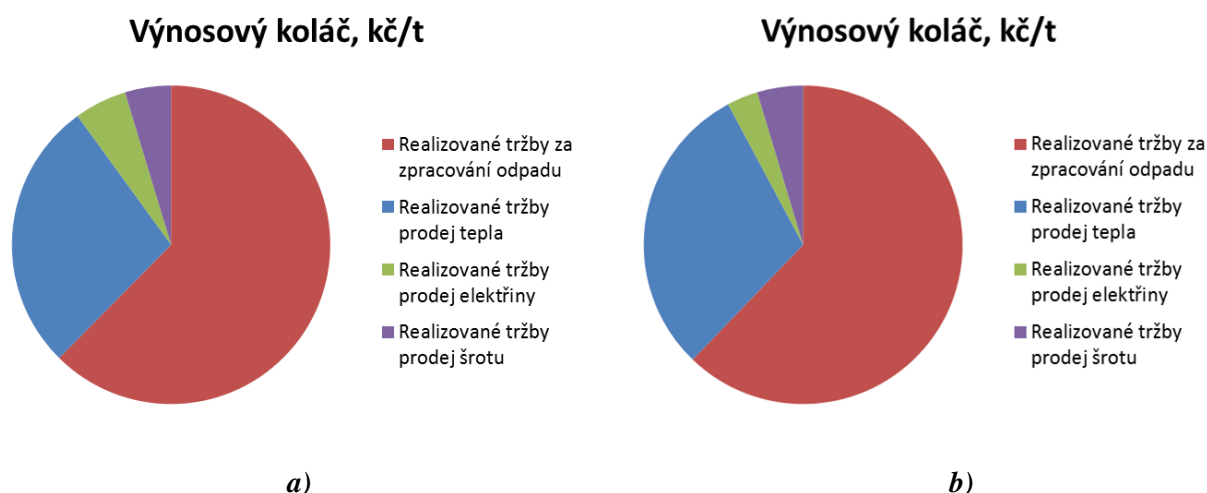
Jednotlivé technologie čištění spalin byly bilančně řešeny v rámci průmyslové zakázky a dále byly využity pro vytvoření modelů technologických uspořádání zařízení EVO v softwaru W2E. Příklad schématu Tech 8 je uveden v příloze č. 4.

### **Technologie pro kapacity 100 kt/r a vyšší**

Pokud použijeme uvedená nastavení pro stejnou lokalitu (např.: Olomouc), kapacitu (200 kt/r), poptávku po teple (maximální možný export v teple) a nastavení poplatku za zpracování odpadu (2000 Kč/t) budou mít struktury výnosů následující podobu. Pro technologie velkých kapacit 6, 7, 8 mají podobnou strukturu dle obr. 21 a) a liší se pouze poměrnou hodnotou výnosů na tunu zpracovaného odpadu, kde nejlépe vychází technologie 7 (4950 Kč/t), následně 6 (4890 Kč/t) a nakonec 8 (4570 Kč/t).

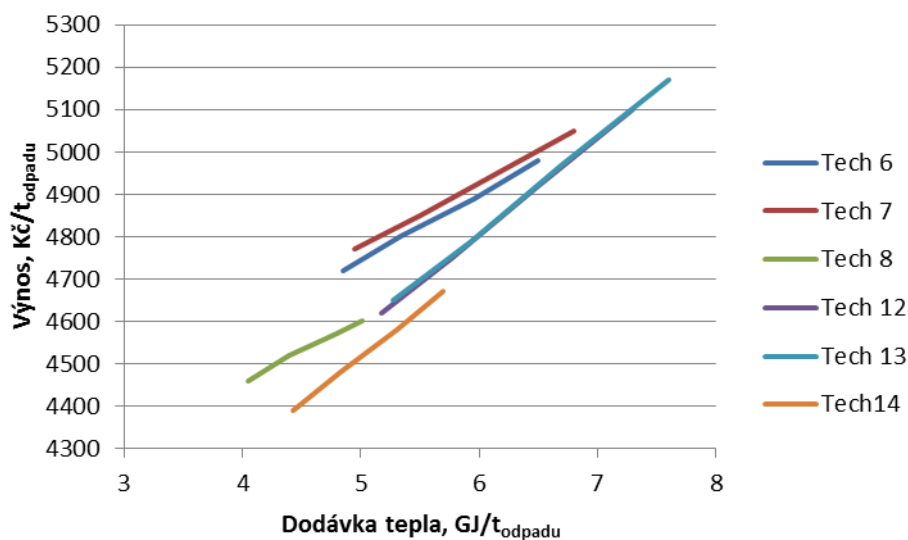
Rozdíl ve struktuře výnosů u technologií 12, 13, 14 je v pouze ve snížení exportu elektřiny v závislosti na rozdílném typu turbíny a tedy snížení podílu tržeb za elektřinu, viz obr. 21 b). Co se týče výše výnosů, jsou tyto tři seřazeny sestupně technologie 13 (4970 Kč/t), technologie 12 (4920 Kč/t) a nakonec technologie 14 (4580 Kč/t).

Technologie s mokrou vypírkou má v obou případech oproti zbylým dvěma výrazně menší maximální možnou dodávku tepla a to až o 20 % a tedy i nižší poměr tržeb za teplo k celkovým výnosům.



**Obr. 21** Struktura výnosů projektu EVO: a) technologie 6, 7, 8; b) technologie 12, 13, 14

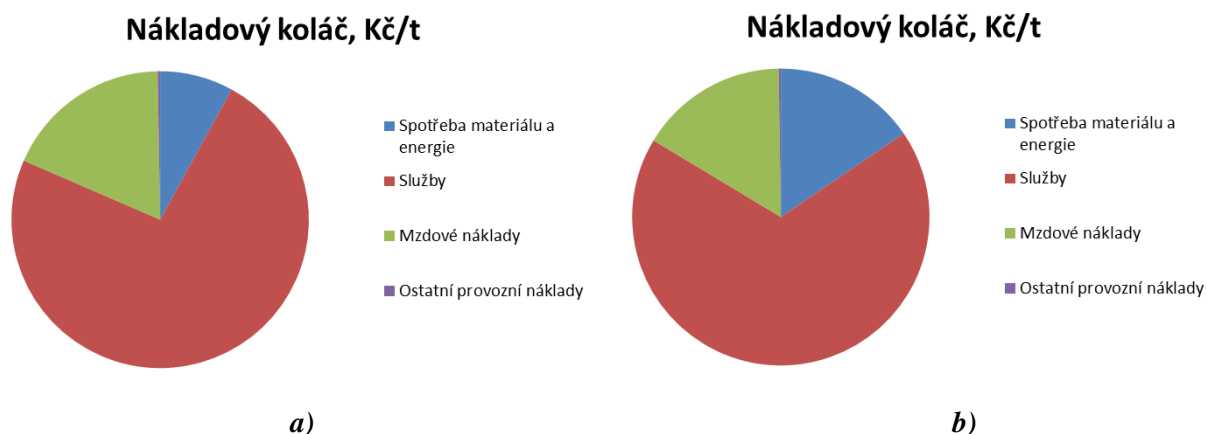
Při uvažování různé dodávky tepla (např.: kolísání v průběhu roku, jiné lokality) byl vyhotoven graf závislosti poměrných výnosů a poměrné dodávky tepla pro uvedené technologie velkých kapacit., viz obr. 22. Hodnoty maximální (pravé konce křivek) odpovídají maximálnímu možnému exportu tepla pro jednotlivé technologie, tzn. např. při použití technologie 7 není možné, aby spalovna dodávala více než  $6,8 \text{ GJ}_{\text{tepla}}/\text{t}_{\text{odpadu}}$ .



**Obr. 22** Závislosti výnosů na dodávce tepla

Co se týče nákladové stránky, tak ve struktuře existují dva případy. Tyto případy jsou ovlivněny volbou způsobu čištění spalin. Jeden případ, viz obr. 23 a), je společný pro technologie používající vápenný hydrát (6, 12) a pro technologie používající mokrou vypírku (8, 14). Náklady v tomto případě dosahují výše zhruba 2400 Kč/t. Druhý případ je pak společný pro technologie využívající Remedial filtr (7, 13), viz obr. 23 b). U této konfigurace

jsou pak náklady na spotřebu energie a materiálu o něco vyšší a celková hodnota dosahuje 2650 Kč/t.

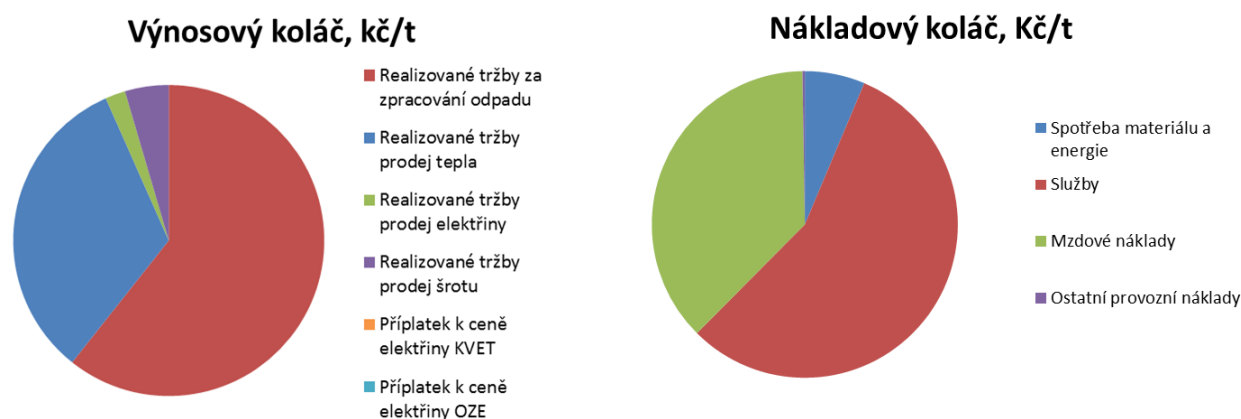


Obr. 23 Struktura nákladů projektu EVO: a) technologie 6, 8, 12, 14; b) technologie 7, 13

### Technologie pro kapacity 10 až 50 kt/r

U spaloven malých kapacit se základní struktura výnosů a nákladů nepatrně liší. Jako příklad budou zobrazeny koláče pro technologie č. 9 o kapacitě 20 kt/r a porovnány s obdobou u velkých spaloven tedy technologií 12 o kapacitě 200 kt/r. Na straně výnosů zaujímá, oproti zařízením s kapacitou 100 a více kt/r, větší část export tepla (obr. 24) a celková hodnota vztažená na tunu zpracovaného odpadu je o něco málo vyšší a to zhruba 5100 Kč/t (v porovnání s obdobou u 100 a více kde je to zhruba 4900 Kč/t, u poplatku ve výši 2000 Kč/t).

Ještě významnější rozdíl je na straně nákladů, kde mnohem větší část zaujímají náklady na mzdy zaměstnanců, viz obr. 24. Náklady pak mohou být až 3000 Kč/t (oproti 2300 Kč/t u technologii 100 a více kt/r).

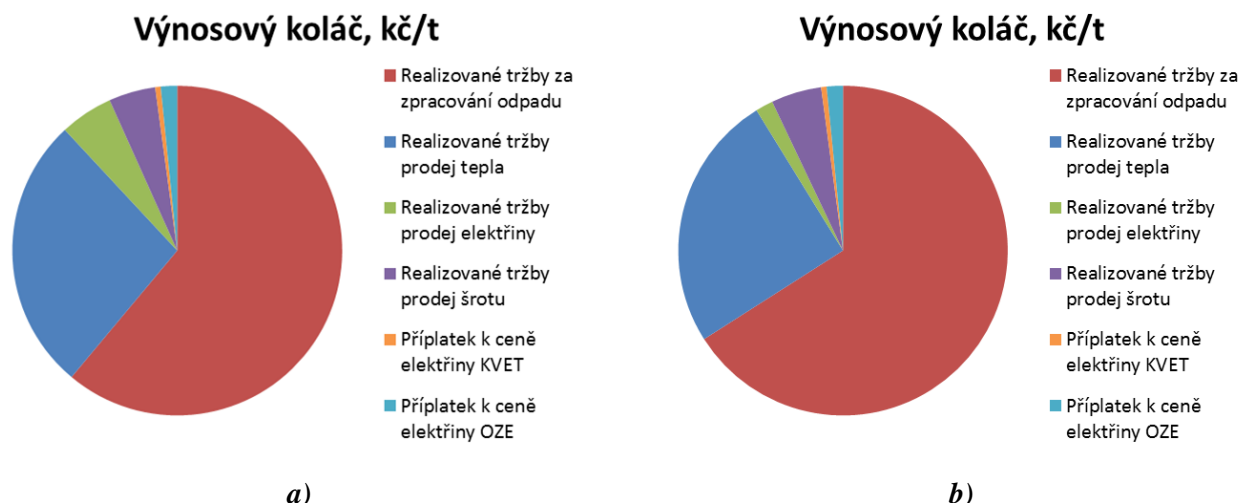


Obr. 24 Výnosy a náklady technologií malých kapacit

### Vliv bonusů na strukturu výnosů

Vzhledem k dříve uvedenému jevu, že KO potažmo SKO je rozdělen na část OZE a část DZE spadá zařízení EVO dle zákona č. 165/2012 Sb. [12] do kategorie podporovaných zdrojů energie. Spalovny tak mají ze zákona nárok na příplatek k ceně elektřiny pocházející

z KVET a z OZE. Vliv bonusů stanovených Energetickým regulačním úřadem na celkovou strukturu výnosu je poměrně nepatrný a dle vývoje v legislativě se bude dále snižovat. Pokud bychom uvažovali podmínky platné z aktuálního cenového rozhodnutí pro rok 2017 [49], tedy příplatek na elektřinu z kombinované výroby elektřiny a tepla (KVET) 140 Kč/MWh pro zařízení s UPI vyšší než 15 a celkovou účinností kogenerační jednotky 45 až 75 % a příplatek na elektřinu vyrobenou z obnovitelných zdrojů energie (OZE) 1060 Kč/t, bude struktura výnosů pro nastavení dle technologie 7 a 14 dle obr. 25 a) a b). U technologie 7 je oproti případu bez bonusů, kdy byla výše výnosů 4950 Kč/t, na úrovni 5060 Kč/t. U technologie 14 je oproti případu bez bonusů, kdy byla výše výnosů 4580 Kč/t, na úrovni 4680 Kč/t.



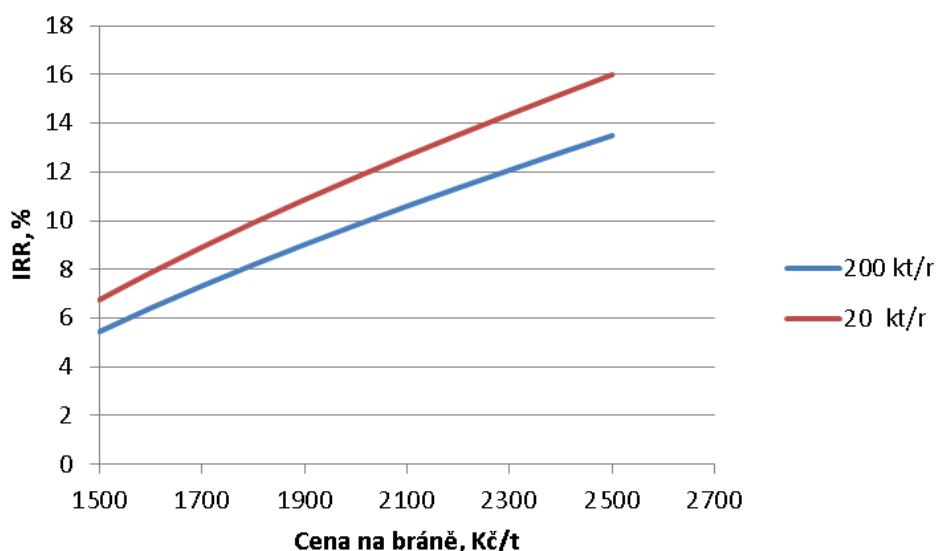
Obr. 25 Vliv bonusů na strukturu výnosů: a) technologie 7; b) technologie 14

### 3.3.4 Analýza vlivu ceny na bráně na IRR projektu

V předchozí kapitole jsme sledovali vliv různých parametrů na strukturu nákladů a výnosů. Na straně výnosů měly největší váhu tržby za zpracování odpadů, které jsou stanoveny výší poplatku za příjem odpadu na bráně zařízení. Ve většině případů byl tento poplatek nastaven na 2000Kč/t. Při změně poplatku by se úměrně měnil i poměr tržeb za zpracování odpadu v celkové struktuře výnosů. Toto by bylo znázorněno měnící se dominantní červenou oblastí například na obr. 25. Při zvyšování by se poměr za tržby ze zpracování odpadu zvyšoval a naopak.

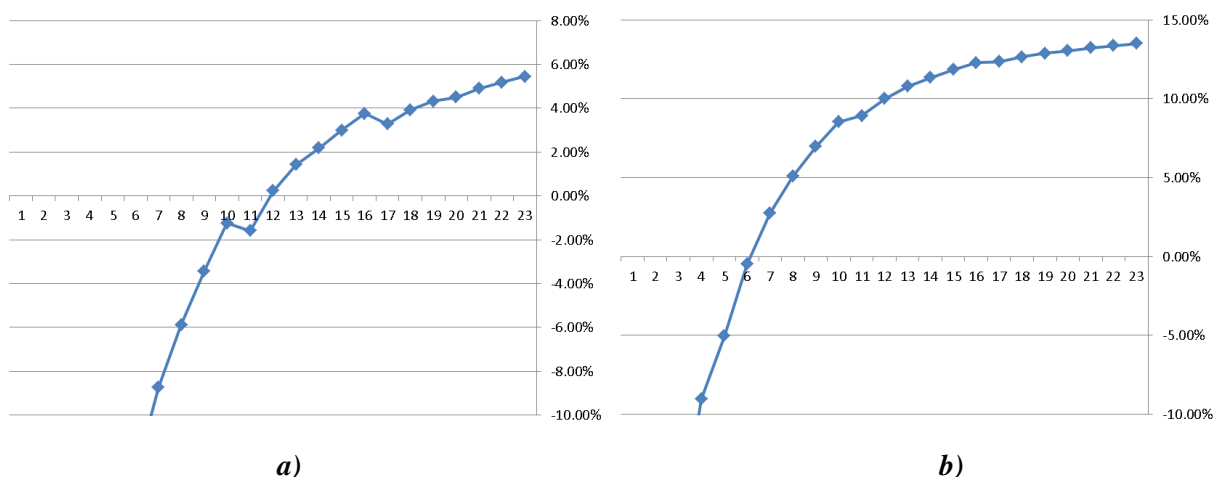
V této kapitole dále nebude řešen vliv na strukturu výnosů, ale bude ukázána další možnost využití Flexi modelu. Bude zde znázorněn vliv změny poplatku na bráně na výsledné vnitřní výnosové procento. Vnitřní výnosové procento (Internal Rate of Return dále jen IRR) je ukazatel pro relativní výnos (rentabilitu), kterou projekt během svého životního cyklu poskytuje.

Pro ukázkou závislosti IRR na výši poplatku na bráně byly vybrány dva případy. První je pro zařízení s kapacitou 200 kt/r a druhé je spalovna s kapacitou 20 kt/r, tedy zástupci z „velkých“ a „malých“ spaloven. Výsledné závislosti jsou pak zobrazeny na obr. 26. Z výsledků vyplývá, že u zařízení menších kapacit stoupá IRR s rostoucí cenou na bráně rychleji než u zařízení větších kapacit a navíc mají zařízení menších kapacit IRR pro jednotlivá nastavení cen na bráně vyšší.



**Obr. 26 Závislost ceny na bráně a kapacity zařízení**

Změna výše poplatku na bráně má také podstatný vliv i na průběh IRR po dobu životnosti projektu, kdy při vyšším poplatku je meziroční nárůst IRR strmější, viz obr. 27.



**Obr. 27 Průběh IRR po dobu životnosti projektu: a) poplatek 1500 Kč/t; b) poplatek 2500 Kč/t**

### 3.3.5 Backsolving a automatizovaný výpočet ceny na bráně při požadované návratnosti projektu

V návaznosti na předchozí kapitolu je výpočet obrácen a z předem určené návratnosti projektu je dopočítávána potřebná cena na bráně zařízení. Toto je pak hlavním výstupem z Flexi modelu potřebným pro další výpočty pomocí nástroje NERUDA, kdy se toto provádí pro různé lokality s cílem odhadnout nutnou cenu na bráně jednotlivých projektů (viz dále obr. 31). K tomuto účelu byla vytvořena procedura, ve které se iteračním způsobem tato cena hledá. Nejprve je automaticky nastavena relativně vysoká cena na bráně, která je poté snižována až do chvíle, kdy IRR dosáhne požadované hodnoty. Tato hodnota není exaktně určena, ale každý investor si stanoví na základě dalších ekonomických kritérií a míře rizika projektu. Požadované IRR z pohledu privátního investora se pohybuje někde okolo hranice

10 % (v případě projektu v ČR) a komunálního nebo státního investora kolem hranice 5 % [19].

Pro zrychlení výpočtu ceny na bráně pro více lokalit byla vytvořena pokročilá procedura, která umožňuje při požadovaných nastavení T-E modelu automaticky stanovit cenu na bráně tak, aby bylo dosaženo očekávané návratnosti investice, a to pro všechny uvažované lokality najednou. V uživatelském rozhraní (viz obr. 28) je seznam lokalit, u kterých lze nastavit následující parametry:

- Minimální kapacita
- Maximální kapacita
- Krok změny kapacity
- Cena tepla
- Minimální požadované IRR, maximální požadované IRR
- Krok změny IRR
- Další investiční náklady (např. dobudování sítě centrálního zásobování teplem v dané lokalitě)
- Minimální investiční dotace
- Maximální investiční dotace
- Krok změny dotace
- Technologie zvolená pro danou lokalitu
- Zahrnutí/vynechání dané lokality ve výpočtu

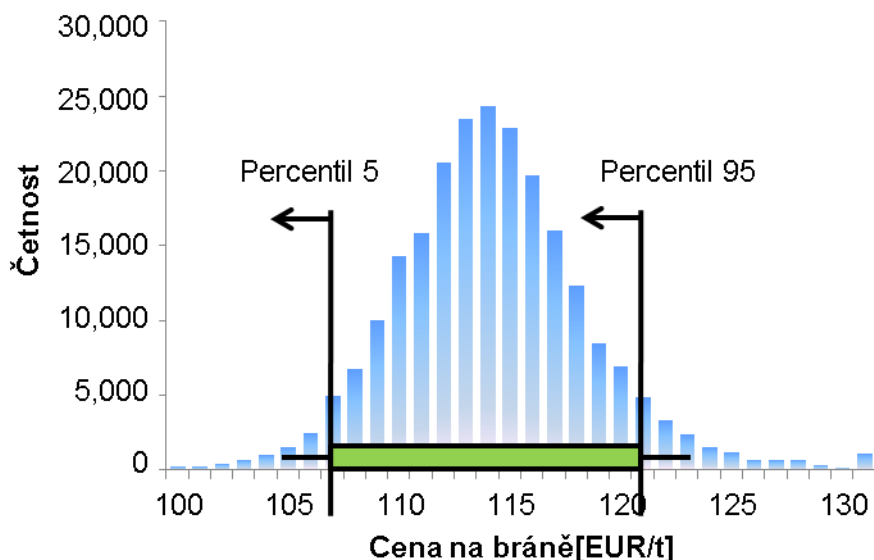
výpočet gate-fee		min.	max.	krok	cena tepla [Kč]	min.	max.	akt.	krok	zap/ vyp	ostatní investice [tis. Kč]	dotace			technologie
číslo lokality	teplo + KVVET	kapacita [kt]	kapacita [kt]	změny kapacity [kt]		požadované IRR	požadované IRR	nastavené IRR	změny IRR			min.	max.	změny dotací [%]	
1	lokalita 1	50	400	50	140	0,08	0,13		0,04	0	0	0	35	5	1
2	lokalita 2	50	400	50	140	0,08	0,13		0,04	0	0	0	35	5	1
3	lokalita 3	50	400	50	165	0,08	0,13	0,12	0,04	1	0	0	35	5	2
4	lokalita 4	50	400	50	140	0,08	0,13		0,04	0	0	0	35	5	2
5	lokalita 5	50	400	50	140	0,08	0,13		0,04	0	0	0	35	5	2
6	lokalita 6	50	400	50	140	0,08	0,13		0,04	0	0	0	35	5	2
7	lokalita 7	50	400	50	190	0,08	0,13	0,12	0,04	1	0	0	35	5	1
8	lokalita 8	50	400	50	140	0,08	0,13		0,04	0	0	0	35	5	1
9	lokalita 9	50	400	50	140	0,08	0,13		0,04	0	0	0	35	5	1

**Obr. 28 Uživatelské rozhraní pro automatický výpočet ceny na bráně pro různá nastavení modelu**

Po spuštění procedury dojde postupně k výpočtu s využitím požadovaných vstupních parametrů. Toho je docíleno pomocí vnořených cyklů „for“. Po každém výpočtu technické a následně ekonomické části modelu je pomocí zpětného dopočtu (backsolvingu) stanovena cena na bráně. Nakonec jsou všechny důležité výstupy vypsány na list „Výpočty“. Výpočet dále pokračuje s novým nastavením.

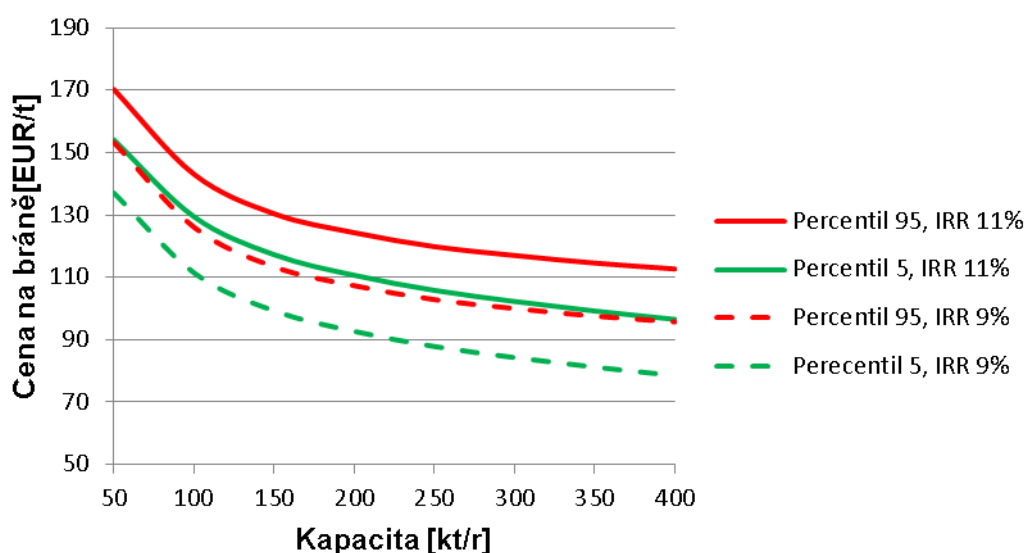
Příkladem výsledků je například predikce ceny na bráně pro požadované IRR a nalezení závislosti ceny na bráně na kapacitě. To vše při měnících se hlavních ekonomických parametrech ovlivňujících výnosy a výdaje zařízení EVO tak, aby byl nasimulován celý průběh životnosti projektu. Autor této práce tuto problematiku publikoval v [50]. Vývoj ekonomických parametrů je popsán scénáři generovanými pomocí Brownova

pohybu [36]. Výsledky pro jednotlivé kapacity byly využity k sestrojení histogramu, který ukazuje rozložení výsledných cen na bráně pro jednotlivé scénáře, viz ilustrační obr. 29.



**Obr. 29 Histogram rozdělení cen na bráně pro kapacitu 150 kt/r**

Simulace byly provedeny pro různé kapacity  $C_{REF}$  v rozmezí  $C_{REF} = 50$  až 400 kt/r. Výsledná závislost ceny na bráně na kapacitě pro jednu danou lokalitu je pak znázorněna na ilustračním obr. 30. V grafu na obr. 30 jsou pak uvedeny dvojí hodnoty, jedny pro požadované IRR 11 % a druhé pro požadované IRR 9 %, které tak mohou reprezentovat různé druhy majetkového uspořádání a různá přání investorů na výnosnost investice.

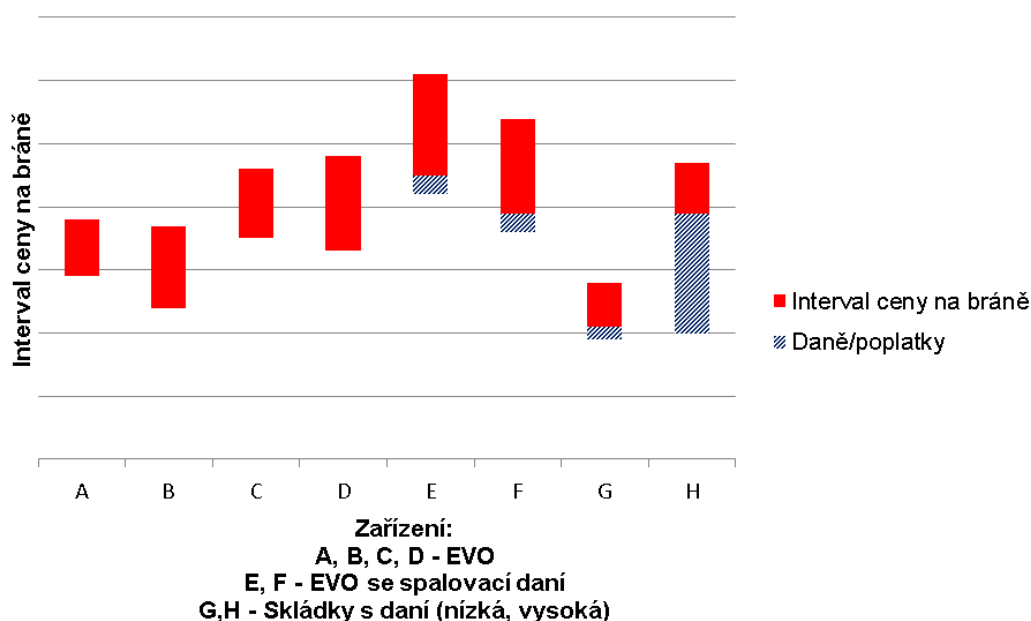


**Obr. 30 Závislost ceny na bráně na kapacitě**

Výsledky z obr. 30 jsou platné pouze pro jednu lokalitu. Pro možnost simulace konkurenčního prostředí je zapotřebí tento výpočet provést pro různé lokality s různými požadavky na



zařízení, technologii, výnos investice atd. Klíčovým vstupem lokálně závislým je množství dodaného tepla a jeho cena kalkulovaná v ekonomice EVO. Tímto tématem se podrobně zabývá práce [51]. Po připočtení možných poplatků nebo daní (např. jiný stát, jiná zařízení) pak můžeme sestavit graf podobný grafu na obr. 31. Tyto výsledky pak vstupují do klasického výpočtu v softwaru NERUDA a umožňují modelovat konkurenční prostředí v odpadovém hospodářství. Navíc mohou být tyto výsledky využity v modifikované úloze nástroje NERUDA ke stanovení dostupnosti odpadu prostřednictvím kritéria WAF (Waste Availability Factor = faktor dostupnosti odpadu). Tato modifikace byla autorem podrobně představena v [50] a Šomplákem v [28].

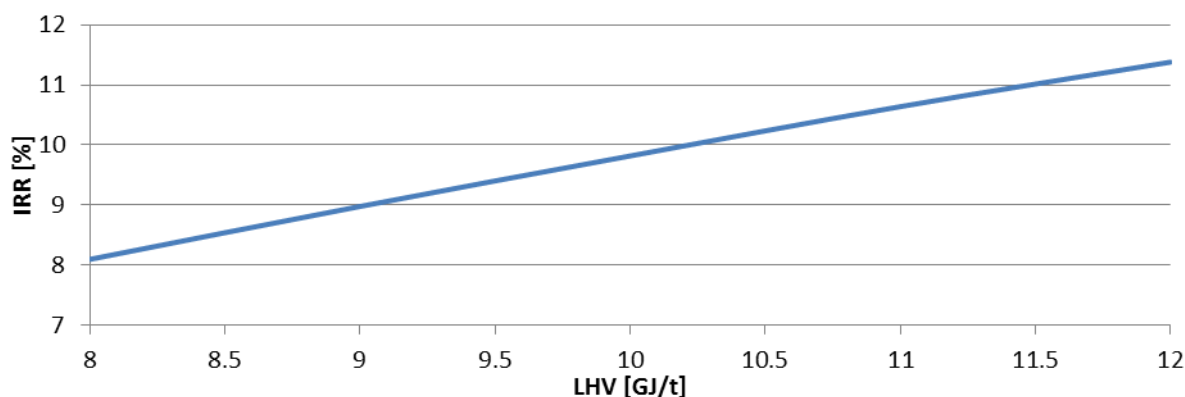


*Obr. 31 Interval cen na bráně pro různá zařízení a poplatky/daně*

### 3.3.6 Analýza vlivu výhřevnosti odpadu na ekonomiku projektu

Problematika odhadu výhřevnosti (LHV z anglického Lower Heating Value) je v praxi často zanedbávána. Při koncepčních návrzích zařízení v dnešní době na území ČR se lze typicky setkat s očekávanou hodnotou 10 GJ/t. Je ale prokázáno, že LHV závisí na mnoha okolnostech a může být obtížné ji odhadnout. Výhřevnost odpadu úzce souvisí s ekonomikou zařízení, zejména s produkcí tepelné a elektrické energie. Přestože hlavní funkcí ZEVO je zpracování odpadu a poplatky za zpracování odpadu tvoří hlavní příjem jednotky, výroba energií a související příjem je rovněž nezanedbatelný.

Flexi model je možné využít k simulaci změn LHV a vlivu na ekonomiku projektu. Na obr. 32 je znázorněna závislost IRR jako míry návratnosti investice na LHV spalovaného odpadu. Jako modelové zařízení byla zvolena jednotka se zpracovatelskou kapacitou 200 kt/r a roční dodávkou tepla mezi 940 až 1250 TJ (v závislosti na LHV). Uvedená závislost platí pro cenu prodáváného tepla 170 Kč/GJ, cenu za zpracování odpadu – tzv. „cenu na bráně“ (gate-fee) ve výši 2100 Kč/t. Pokles LHV není v tomto případě kompenzován navýšením kapacity.

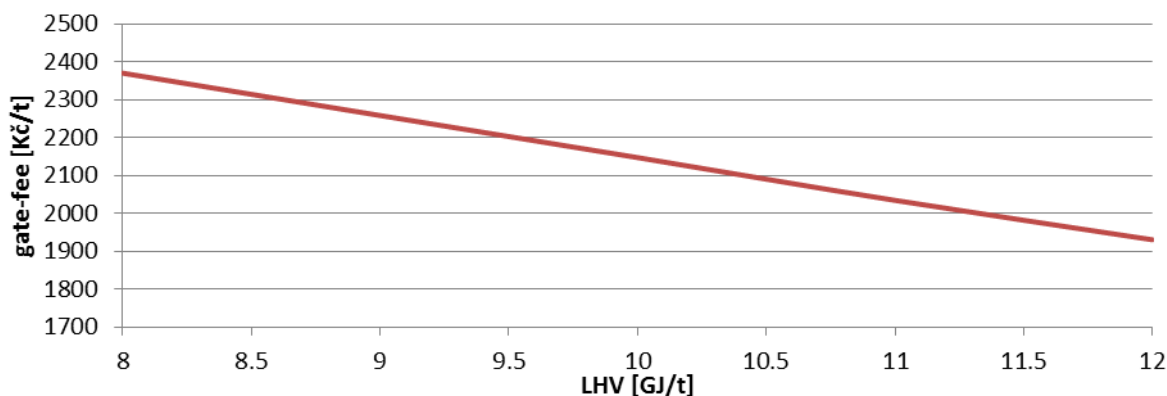


**Obr. 32 Závislost vnitřního výnosového procenta na výhřevnosti zpracovávaného odpadu.**

*Pozn.: Výpočet pro modelový příklad.*

Požadovaná míra návratnosti se liší podle typu investora (komerční vs. municipální projekt). Z výše uvedeného příkladu je patrné, že rozdíl LHV ve výši 1 GJ/t odpovídá v tomto případě řádově 1 % IRR. Jestliže budeme uvažovat, že akceptovatelná míra návratnosti investice, vyjádřená pomocí IRR, pro komerční subjekt činí cca 10 %, pak může změna LHV prezentovaná ve výše uvedeném příkladu ovlivnit očekávání a rozhodnutí o realizaci projektu.

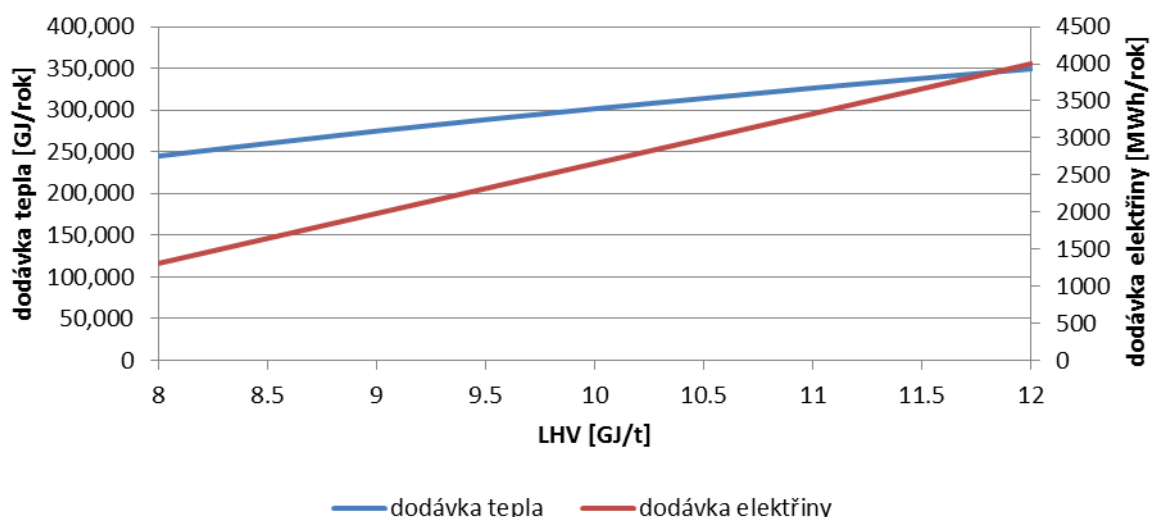
Z druhého pohledu může být výpadek příjmů z prodeje energií kompenzován příjmy za zpracování odpadu. Je tedy důležité správné nastavení gate-fee v kontraktech s producenty odpadů. Taková situace je znázorněna na obr. 33, kde je zachycena závislost gate-fee na výhřevnosti. Křivka byla stanovena tak, aby bylo zachováno IRR ve výši 10 %. Z grafu je patrné, že rozdíl v LHV ve výši 1 GJ/t odpovídá v tomto případě řádově rozdílu 125 Kč/t, což je z hlediska udržitelnosti projektu nezanedbatelná hodnota.



**Obr. 33 Závislost ceny na bráně na výhřevnosti zpracovávaného odpadu.**

*Pozn.: Výpočet pro modelový příklad.*

Protože u jednotek EVO menších kapacit hrají z hlediska ekonomiky příjmy za prodej tepla větší roli, je zde i významnější vliv LHV na ekonomiku. Graf na obr. 34 ukazuje příklad závislosti LHV přijímaného odpadu a exportovaných energií u zařízení EVO s kapacitou 40 kt/r. Vzhledem k nízké účinnosti výroby elektrické energie v těchto zařízeních může dojít k situaci, kdy nebude při nízké LHV možné touto elektřinou pokrýt vlastní spotřebu a bude tedy nutné ji nakupovat za výrazně vyšší cenu ze sítě.



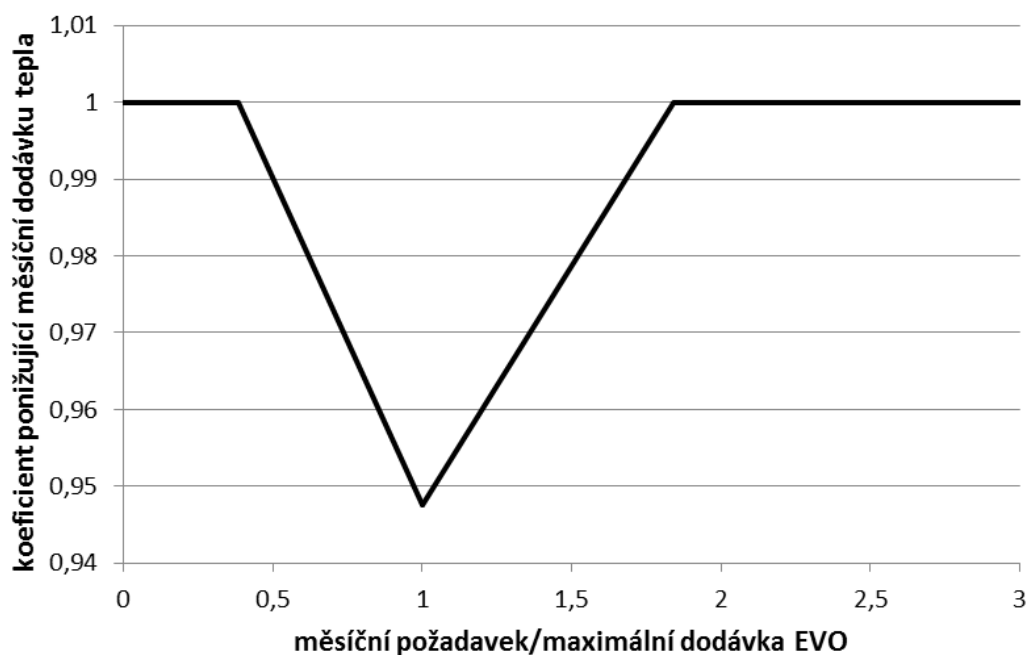
*Obr. 34 Vliv výhřevnosti odpadu na výrobu elektřiny a tepla*

Zatímco závislost vyrobené elektřiny na LHV je v tomto případě víceméně lineární kvůli využití protitlaké turbíny, hodnota exportovaného tepla konverguje k poptávce v síti CZT a závisí tedy na konkrétní lokalitě.

### 3.3.7 Koeficienty zohledňující nerovnoměrnost v dodávkách tepla

Do Flexi modelu byly dále implementovány koeficienty, které zohledňují výkyvy v dodávkách tepla do sítě CZT v průběhu měsíce. Protože do modelu vstupují údaje o poptávce po teple pouze v rámci celkového měsíčního odběru, bylo nutné zohlednit výkonové špičky, které v některých případech v důsledku nedostatečného maximálního výkonu jednotky EVO musí být pokryty z jiného zdroje a následně je tedy do sítě zařízením EVO dodáno nižší množství tepla, než by bylo v případě zjednodušení na konstantní výkon během celého měsíce.

K tomuto účelu slouží koeficienty, které jsou voleny na základě obr. 35. V proceduře VBA je nejprve vypočtena maximální měsíční dodávka z jednotky EVO v případě maximálního výkonu během celého období. V závislosti na poměru požadavku v aktuálním měsíci a této maximální dodávky je následně vypočten koeficient. Teoretická měsíční dodávka je potom vynásobena tímto koeficientem, čímž dojde k jejímu snížení. Více informací na toto téma publikoval Putna v [52] a [51].



*Obr. 35 Závislost koeficientu pro korekci měsíční dodávky tepla na poměru měsíčního požadavku a maximální teoretické dodávky z jednotky EVO [51]*

### 3.3.8 Citlivostní analýza s využitím náhodných parametrů

Za účelem analyzování vlivu změn vstupních parametrů byla do T-E modelu přidána procedura, která využívá vstupních údajů volených náhodně z určitého intervalu. V uživatelském rozhraní (viz obr. 36) je možné nastavit čísla lokalit, pro které má být proveden výpočet, roční zpracovatelské kapacity, požadovaná vnitřní výnosová procenta a počet výpočtů pro každou z řešených lokalit.

Ve spodní části rozhraní jsou potom nastaveny horní a dolní meze pro generování náhodných vstupních parametrů. V současné chvíli se jedná o počet zaměstnanců, cenu prodáváného tepla, eskalační koeficient (inlace) a investiční náklady. Jedná se zejména o data, která nelze stanovit s dostatečnou přesností, a mohou nezanedbatelně ovlivnit ekonomiku projektu. Cílem bylo zjistit, které parametry jsou pro ekonomiku projektu nejdůležitější. Tím pádem je nutné je dále zpřesňovat a určit interval, v jakém se bude pohybovat cena na bráně s danou pravděpodobností.

počet výpočtů pro jednu lokalitu a kapacitu

číslo posuzovaných lokalit

nastavovaná kapacita

nastavovaná IRR

minimální počet zaměstnanců

maximální počet zaměstnanců

záporná odchylka ceny tepla [%]

kladná odchylka ceny tepla [%]

záporná odchylka eskalací [%]

kladná odchylka eskalací [%]

záporná odchylka investičních nákladů [%]

kladná odchylka investičních nákladů [%]

100

18

10

4

4

12

10

10

10

10

10

0

30

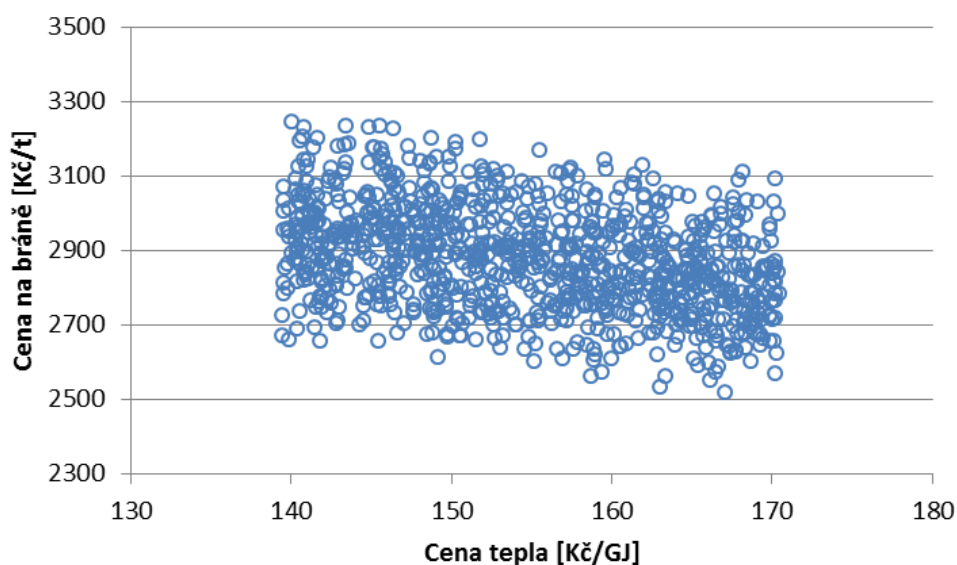
### Citlivostní analýza

23	17	24	22
20	30	40	
10			

SPUSTIT VÝPOČET

**Obr. 36** Uživatelské rozhraní pro výpočet ceny na bráně s využitím náhodných parametrů

Generování náhodných vstupních parametrů potom probíhá prostřednictvím procedury VBA. Pro aktuálně nastavené vstupy je vypočtena požadovaná cena na bráně a výsledek je vypsán na list „Výpočty“. Výsledný výpis je potom možné využít pro stanovení citlivosti ekonomiky projektu na některé obtížně odhadnutelné veličiny. Na obr. 37 je uveden příklad využití této funkce, kde je znázorněno, v jakém rozsahu se bude pohybovat cena na bráně, pokud se bude v určitém rozmezí měnit nastavený počet zaměstnanců, investiční náklady nebo cena tepla.



**Obr. 37** Příklad využití citlivostní analýzy ve Flexi modelu – závislost ceny na bráně na ceně tepla

## 4 ENVIRONMENTÁLNÍ DOPAD

V předchozích kapitolách byl sestaven T-E model zařízení EVO, jehož výsledky jsou využívány v nástroji NERUDA pro posuzování optimálních řešení v OH. Hlavní a jediné rozhodovací kritérium bylo ekonomické hledisko. Tato část práce se zabývá druhým rozhodovacím kritériem, a to je hledisko ekologické. V praxi existuje celá řada způsobů posouzení určité lidské činnosti na životní prostředí. Autor hledal na základě spolupráce s německou společností bifa Umweltinstitut GmbH (dále jen bifa) v rámci výzkumných projektů WtECC vhodnou metodiku, jak dopad na životní prostředí vyčíslit a následně zahrnout do softwaru NERUDA. Výsledky spolupráce byly částečně publikovány v [53] a v rozšířené podobě jsou uvedeny v této práci.

Ve vztahu ke klimatu jsou poměrně často zmiňovány a diskutovány emise tzv. skleníkových plynů. V oblasti zpracování odpadů a energetiky jsou pak tyto emise nejpodstatnější [54]. Proto byly v této práci a pro sadu nástrojů NERUDA zvoleny za ekologické kritérium. V podstatě jde o identifikaci a sledování parametrů, které přispívají ke globálnímu oteplování a jejich porovnání vůči zařízením využívajícím primární suroviny, nebo vůči ostatním zařízením nakládajícím s odpady. GWP (z anglického Global Warming Potential) je pak jednotkou k vyčíslení dopadu na životní prostředí a jako takový byl ve spolupráci s bifa připraven výpočet pro zařízení na zpracování odpadů. Aby bylo možné různé technologie a procesy porovnávat, je zapotřebí určit základní jednotku. GWP je standardizováno pomocí emisí oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) a je vyjádřeno jednotkou v kilogramech  $\text{CO}_2$  ekvivalentů (GWP jednoho kilogramu  $\text{CO}_2$  se rovná jednomu kilogramu  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ) [55]. Přesněji, GWP vyjadřuje relativní množství tepla zachyceného emisí jedné tuny určitého plynu po danou zkoumanou dobu oproti teplu zachycenému jednou tunou  $\text{CO}_2$ . Ostatní skleníkové plyny jsou pak počítány jako násobky základní jednotky. Uvedení časového horizontu je velmi podstatnou součástí určení GWP. Některé plyny mají na začátku velký význam pro skleníkový efekt, ale poměrně brzy se z atmosféry vytratí. Naopak některé plyny nemají vysoký účinek, ale v atmosféře vydrží po dlouhou dobu. GWP je pro plyny stanovováno pro časové horizonty 20, 100 a 500 let [55]. Obvyklé je využívat hodnoty pro 100 leté období. Hodnoty pro skleníkové plyny jsou uvedeny v tab. 3. Z hlediska výpočtu v této práci je nejdůležitější z uvedených hodnota pro metan.

*Tab. 3 Hodnoty GWP pro vybrané skleníkové plyny a různé časové horizonty [55]*

	Doba rozpadu	GWP <sub>20</sub>	GWP <sub>100</sub>	GWP <sub>500</sub>
	[roky]	[kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ]	[kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ]	[kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ]
<b>CH<sub>4</sub></b>	12	84	28	7
<b>N<sub>2</sub>O</b>	121	264	265	153
<b>CFC-11</b>	45	6 900	4 660	-
<b>HFC-134a</b>	13	3 710	1 300	435
<b>CF<sub>4</sub></b>	50 000	4 880	6 630	-

Pro vyčíslení ekologického dopadu pomocí parametru GWP je v této práci využita zjednodušená metoda posuzování životního cyklu (Life Cycle Assessment = LCA). LCA je

nástroj nebo metoda, který vznikl kvůli potřebě posouzení environmentálních aspektů jakéhokoliv výrobku nebo procesu ve všech stádiích života [56]. Každá studie LCA se řídí dle metodiky obsažené v normě ISO 14040:2006 [40]. Dle této normy je LCA rozdělena na čtyři základní fáze:

- Stanovení účelu a rozsahu studie
- Inventarizační analýza životního cyklu
- Hodnocení dopadů
- Interpretace výsledků.

V první fázi stanovení účelu a rozsahu je určeno, k čemu budou výsledky použity, rozsah studie a dále je zvolena funkční jednotka. Výsledky metody LCA jsou využity pro vyhodnocení ekologického dopadu jednotlivých způsobů zpracování SKO. V této práci se pro jednotlivé druhy zpracování SKO používá zjednodušená metoda LCA, kdy je uvažováno pouze s vstupy a výstupy samotného procesu nakládání s odpadem. Vzhledem k tomu, že SKO může být zpracováno ve všech uvažovaných zařízeních, nemá předchozí výroba či použití produktů, ze kterých se odpad skládá, žádný vliv na porovnání environmentální stopy jednotlivých procesů. Funkční jednotkou je pak zvolena jedna tuna odpadu.

Druhá fáze tzv. inventarizační analýza je neutrálním sběrem vstupů a výstupů hodnoceného systému. V našem případě je to inventář vstupů a výstupů popisující tři základní způsoby nakládání s odpadem:

- Energetické využití (EVO) = spalovna, viz kapitola 4.2.
- Skládkování, viz kapitola 4.3.
- Mechanicko-biologická úprava (MBÚ), viz kapitola 4.4.

Pro všechny tři varianty byl sestaven výpočtový model v prostředí MS Excel, kde jsou vyznačeny základní vstupní a výstupní parametry. Stanovení LCA pro zařízení EVO bylo následně rozšířeno o variantu tzv. monobloku, tedy zařízení, které je určené k termickému zpracování TAP, viz kapitola 4.5. Na druhou fázi navazuje fáze třetí (hodnocení dopadů), která se zaměřuje na vyhodnocení významu potenciálních environmentálních dopadů. V této fázi dochází nejdříve k přiřazení jednotlivých prvků inventáře příslušným oblastem popisu životního prostředí dle zvolené metodiky. Jednotlivé metodiky posuzování jsou pak dále děleny na tzv. kategorie, které popisují jeden environmentální vliv. V této práci při použití zjednodušené LCA je uvažována kategorie globálního oteplování (GWP) s jednotkou kg CO<sub>2eq</sub>. Výpočet ekologické zátěže pomocí GWP je pak rozdělen na dvě části:

- Environmentální zátěž – produkce skleníkových plynů a jejich únik do ovzduší.
- Environmentální kredit (příspěvek ke zlepšení) – snížení globální produkce skleníkových plynů náhradou fosilních paliv.

Druhá a třetí fáze jsou pak v detailu popsány v následujících kapitolách 4.2 až 4.5. Rozsáhlé práce a analýzy na téma emise skleníkových plynů ze zpracování SKO probíhaly a jsou neustále aktualizovány americkou agenturou United States Environmental Protection Agency

(EPA) a jsou publikovány v přehledovém dokumentu [57]. Tento dokument pak slouží jako zdroj základních parametrů pro popsané výpočty v dalších částech této práce.

Nedílnou součástí odpadového hospodářství je i svoz a doprava odpadu. Environmentální zátěže nebo kredity z dopravy byly v této práci řešeny nezávisle na jednotlivých způsobech nakládání s odpady a jsou uvedeny v kapitole 4.6.

## 4.1 SLOŽENÍ ODPADU

Hlavním prvkem, který hraje důležitou roli v určení dopadu jednotlivých způsobů nakládání s odpadem na produkci skleníkových plynů, je samotné složení zpracovávaného směsného komunálního odpadu, viz tab. 4. Nejdůležitějšími parametry odpadu jsou pak výhřevnost a obsah fosilního uhlíku. Obsah fosilního uhlíku v odpadu má při jeho spalování za následek produkci skleníkového plynu CO<sub>2</sub>. Oběh uhlíku v přírodě je rozdělen na dvě smyčky – krátký „biogenní“ oběh a dlouhý oběh. U dlouhého cyklu se uvažuje uhlík zachycený ve fosilních palivech a od nich odvozených výrobcích. Biogenní cyklus uvažuje uhlík ve všech živých organismech. Obecně se uvolněný biogenní uhlík nepočítá jako zátěž pro životní prostředí a je brán jako nutná součást přírodního koloběhu [1].

Druhým důležitým parametrem je výhřevnost odpadu. Výhřevnost určuje kolik energie je obsaženo v SKO a tím pádem determinuje množství elektrické energie a tepla, která může být vyrobena při energetickém využití. Stanovení výhřevnosti SKO je obtížná záležitost. Na ÚPI byl nejen k tomuto účelu vyvinut nástroj Justine, viz kapitola 2.1.

*Tab. 4 Průměrné složení SKO pro ČR, data z nástroje Justine a společnosti bifa*

<b>SKO Frakce</b>	<b>Obsah jednotlivých</b>	<b>Výhřevnost [MJ/kg]</b>	<b>Fosilní uhlík [g/kg]</b>	<b>Biogenní uhlík [g/kg]</b>
<b>Kovy</b>	2,5	0,0	0	0
<b>Sklo</b>	5,5	0,0	0	0
<b>Papír + nápojové kartony*</b>	8	14,6	73	317
<b>Plasty</b>	10	34	680	0
<b>Elektro</b>	0,4	22,9	441	0
<b>Textil</b>	5,5	15,0	172	218
<b>Ostatní spalitelný odpad</b>	14	4,4	45	135
<b>Organický odpad</b>	29	4,6	0	160
<b>Nebezpečný odpad</b>	0,6	17,0	416	0
<b>Minerální odpad</b>	3	0,0	19	0
<b>Frakce pod 40mm</b>	21,5	5,1	46	85
<b>Souhrn</b>	<b>100</b>	<b>8,7</b>	<b>105</b>	<b>120</b>

*\*) Záleží na rozložení množství papíru a nápojových kartonů, zde uvažováno papír: nápojové kartony = 2:1.*



Podobné prvkové složení a popsání jednotlivými parametry pak bylo dále určeno také pro TAP, které jsou výstupy z MBÚ a vstupy do monobloků, viz kapitoly 1.2.2 a 4.5. Složení a výsledný obsah fosilního uhlíku pro TAP využívaný v této práci je uveden v tab. 5. Data pro TAP a MBÚ jsou získávána z modulu nástroje Justine, který je popsán například v [33].

**Tab. 5 Složení TAP uvažovaných v této práci [33]**

<b>TAP Frakce</b>	<b>Obsah jednotlivých</b>	<b>Výhřevnost [MJ/kg]</b>	<b>Fosilní uhlík [g/kg]</b>	<b>Biogenní uhlík [g/kg]</b>
<b>Kovy</b>	0	0,0	0	0
<b>Sklo</b>	0	0,0	0	0
<b>Papír + nápojové kartony*</b>	22,8	14,6	73	317
<b>Plasty</b>	26,8	34	680	0
<b>Elektro</b>	0,9	22,9	441	0
<b>Textil</b>	11	15,0	172	218
<b>Ostatní spalitelný odpad</b>	30	4,4	45	135
<b>Organický odpad</b>	3	4,6	0	160
<b>Nebezpečný odpad</b>	1,3	17,0	416	0
<b>Minerální odpad</b>	0	0,0	19	0
<b>Frakce pod 40mm</b>	4,2	5,1	46	85
<b>Souhrn</b>	<b>100</b>	<b>16,3</b>	<b>245</b>	<b>143</b>

\*) Záleží na rozložení množství papíru a nápojových kartonů, zde uvažováno papír: nápojové kartony = 2:1.

## 4.2 GWP – ZAŘÍZENÍ EVO

Vzhledem k zaměření této práce i celého nástroje NERUDA je prvním způsobem, pro který byl sestaven výpočet GWP, energetické využití odpadů. Pro tato zařízení proběhly nejrozsáhlejší analýzy, jejichž výsledky jsou popsány níže.

Pro zjednodušené LCA pak byl ve fázi inventarizace využit existující Flexi model, viz kapitola 3.3. Při spalování odpadů vznikají emise oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) a oxidu dusného (N<sub>2</sub>O), které jsou po průchodu systémem čištění spalin vypouštěny do ovzduší. Jak bylo uvedeno výše, jako environmentální zátěž je brán pouze podíl CO<sub>2</sub>, který vzniká oxidací fosilního uhlíku podle spalovací rovnice (3).



Složení odpadu je dáno kapacitou a příslušnou svozovou oblastí. Pro jednotlivé složky odpadu, tak jak jsou uvedeny v tab. 4, je pak nejdůležitější právě obsah tzv. fosilního uhlíku. Na základě jeho množství (tab. 4) a molární hmotnosti (12 kg/kmol) je stanoveno látkové množství vznikajícího CO<sub>2</sub> a z toho je zpětně přes molární hmotnost CO<sub>2</sub> (44 kg/kmol) dopočítáno množství vznikajícího CO<sub>2</sub> v kilogramech, potažmo CO<sub>2eq</sub>. Při spalování tohoto

uhlíku dochází k uvolňování CO<sub>2</sub> a nárůstu negativní složky GWP. Emise N<sub>2</sub>O nehrají na výslednou hodnotu GWP oproti emisím CO<sub>2</sub> téměř žádnou roli i přes GWP-koefficient 265 krát CO<sub>2</sub>. Jak je popsáno například v [57] výsledná hodnota CO<sub>2eq</sub> pro N<sub>2</sub>O je více než 10 krát nižší než pro CO<sub>2</sub>.

Teplo ze spalin je v kotli na odpadní teplo (HRSG) využité k produkci přehřáté páry. Tato pára je následně použita k produkci elektřiny a tepla pro další využití buď ve formě horké vody, nebo páry (např.: centrální zásobování teplem – CZT, pára pro průmyslové využití). Pro výpočty v této práci i v nástroji NERUDA jsou zařízení vyšších kapacit (více než 80 kt/r) uvažovány s parní kondenzační odběrovou turbínou (KOT) a zařízení malých kapacit (do 60 kt/r) s parní protitlakou turbínou (PT). Díky tomu, že odpad je rozdělen z části na obnovitelný a z části na druhotný zdroj energie (OZE a DZE, viz obr. 4), je možné energii (tepelnou i elektrickou), která je v zařízení EVO produkována brát jako environmentální kredit, protože nahrazuje energii vyprodukovanou pomocí primárních fosilních surovin. Z parametrů zařízení EVO jsou tedy nejdůležitější produkce elektřiny a tepla a jejich účinnost. Co se týče parametrů zdrojů, které EVO nahrazuje, je opět zapotřebí znát produkce elektřiny a tepla a účinnosti. Hlavním parametrem je však palivový mix a obsah uhlíku v něm, nebo emisní faktor paliva. Palivový mix nahrazeného zdroje má velmi významný vliv na množství uspořených CO<sub>2eq</sub>. Rozdíl například mezi emisním faktorem zemního plynu (55 g CO<sub>2</sub>/MJ<sub>výhřevnosti</sub>) a hnědého uhlí (99 g CO<sub>2</sub>/MJ<sub>výhřevnosti</sub>) je téměř dvojnásobný. Hodnoty emisních faktorů jsou stanoveny vyhláškou č. 480/2012 Sb. [58]. V této práci je pro produkci elektrické energie použit souhrnný emisní faktor pro palivový mix ČR, viz tab. 6. V případě vyrobeného tepla a jeho náhrady jsou možné dva přístupy. Při využití LCA a zhodnocení ekologických dopadů na lokální úrovni se využívá emisní faktor zařízení, jehož produkce tepla je nahrazena produkcí ze zařízení EVO. Při řešení úlohy na úrovni celé ČR je pak využit emisní faktor za energetický mix ČR při výrobě tepla, viz tab. 6. Do budoucna je plánováno nahradit celkový energetický mix u tepla hodnotami pro jednotlivé sítě CZT.

**Tab. 6 Palivový mix energetiky a teplárenství ČR, data [59], [60] a [61]**

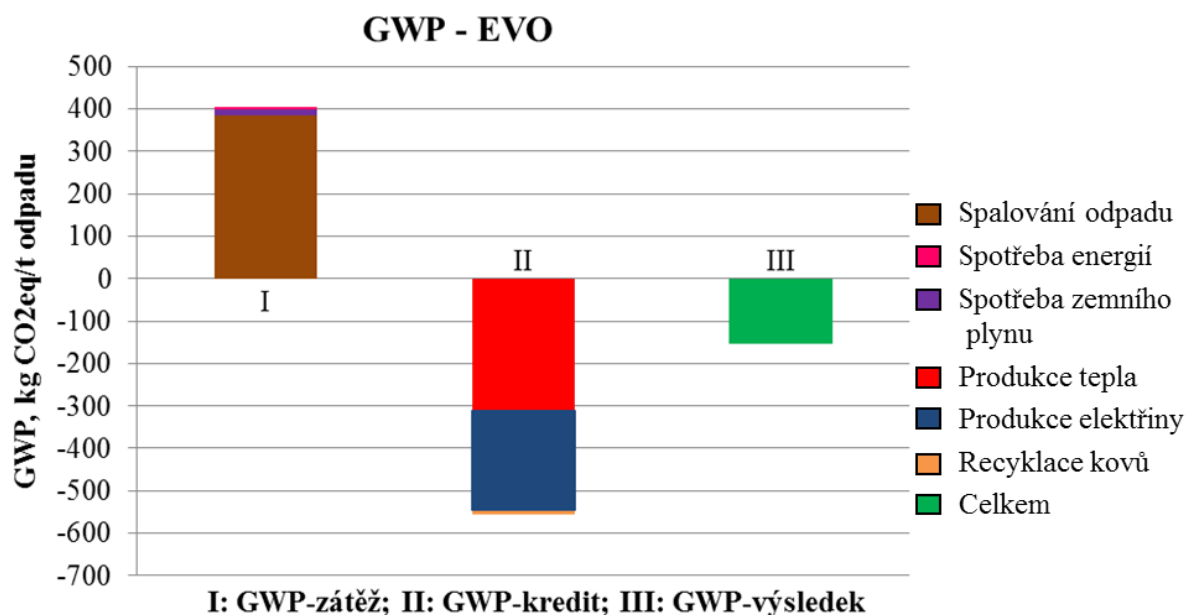
Elektřina			Teplo		
Zdroj	Podíl [%]	Produkce CO <sub>2</sub> [kg/GJ vyrobené elektřiny]	Zdroj	Podíl [%]	Produkce CO <sub>2</sub> [kg/GJ vyrobeného tepla]
Uhlí	52	337	Uhlí	59	112
Zemní plyn	6	187	Zemní plyn	24	62
Jádro	20	0	Jiné plyny	4	73
Voda	11	0	Obnovitelné	9	0
Slunce	10	0	Topné oleje	4	85
Vítr	1	0	-	-	-
<b>Celkem</b>	<b>100</b>	<b>186</b>	<b>Celkem</b>	<b>100</b>	<b>88</b>

Dalšími prvky z inventáře vstupů a výstupů jsou pevné výstupy ze spalovny. Těmi jsou škvára ze spalovací komory a popílek zachycený v systému čištění spalin. Ze škváry jsou

recyklovány kovy a poté je ukládána jako inertní materiál na skládky nebo využívána ke stavebním účelům (např.: stavby komunikací). S popílkem je pak nakládáno jako s nebezpečným odpadem a je ukládán na skládky nebezpečného odpadu. Oba tyto výstupy jsou ale z hlediska GWP neutrální a nevznikají žádné další skleníkové plyny, kromě dopravy. Jediný vliv na výslednou hodnotu GWP a to kladný má recyklace kovů. Jedná se o šetření emisí skleníkových plynů, které vznikají při výrobě kovů z primárních surovin.

V následujícím grafu (obr. 38) je pak přehledně znázorněn výsledek výpočtu negativních i pozitivních faktorů ovlivňujících GWP pro modelovou variantu zařízení EVO. Modelová varianta je pro zařízení o kapacitě 100 kt/r, s průměrnou roční produkcí tepla 3,64 GJ/t<sub>odpadu</sub> a produkcí elektrické energie 0,35 MWh/t<sub>odpadu</sub>. Poptávka po teple v uvažované lokalitě je uvedena na obr. 18. Jednotlivé barvy v grafu značí:

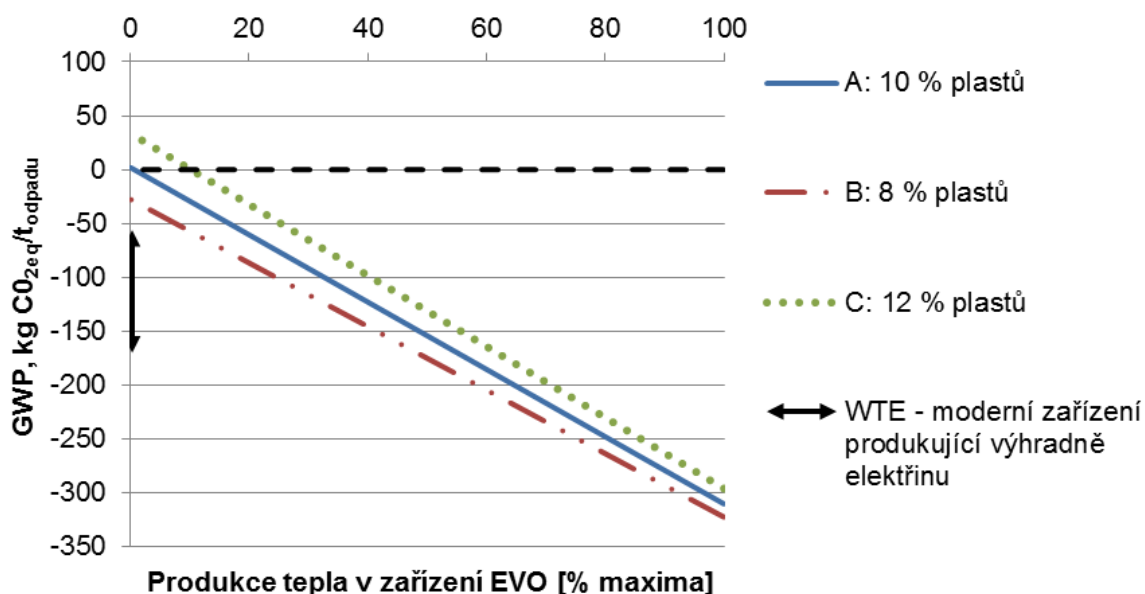
- Zátěže:
  - Hnědá: GWP koresponduje s množstvím CO<sub>2</sub> produkovaných samotným spalováním odpadu o složení odpovídající tab. 4. Toto je nejdůležitější ze zátěží.
  - Růžová: Elektrická nebo tepelná energie dodaná z primárních zdrojů, pokud je taková energie zapotřebí a nakoupena.
  - Fialová: Spotřeba zemního plynu ve spalovací komoře pro stabilizaci spalování, nebo v případě najíždění a sjíždění kotle při odstávce. Uvažovaná spotřeba zemního plynu ve výpočtu je 220 MJ/t<sub>odpadu</sub>.
- II. Kredity:
  - Červená: Množství CO<sub>2eq</sub> ušetřené při produkci tepla oproti množství, které by bylo vyprodukováno z primárních zdrojů. V úvahu je brán energetický mix ČR pro výrobu tepla [60].
  - Modrá: Množství CO<sub>2eq</sub> ušetřené při produkci elektřiny oproti množství, které by bylo vyprodukováno z primárních zdrojů. V úvahu je brán energetický mix ČR pro výrobu elektřiny [59].
  - Oranžová: Recyklace kovů a množství CO<sub>2eq</sub> ušetřené oproti výrobě z primárních surovin.
- III. Výsledek: Výsledná hodnota po sečtení environmentálních zátěží a kreditů. V modelovém příkladu je výsledná hodnota záporná, což značí ušetření zhruba 150 kg CO<sub>2eq</sub>/t<sub>odpadu</sub>.



**Obr. 38 EVO: Graf průměrné roční GWP vztaženého na 1 tunu odpadu**

Pro popsání zařízení EVO bylo využito zjednodušené metodiky LCA a pomocí GWP byl vyjádřen environmentální dopad. Z výsledků na obr. 38 je patrné, že environmentální zátěž je výhradně tvořena samotným spalovacím procesem a oxidací fosilního uhlíku. Environmentální kredity jsou výlučně tvořeny uspořenými emisemi z primárních zdrojů při produkci elektřiny a tepla. Pouze tyto tři sektory (spalování, produkce elektřiny, produkce tepla), které mají více než 90 % podíl na výsledném GWP jsou následně použity jako ekologické kritérium v nástroji NERUDA. K tomuto je přistoupeno z důvodu zjednodušení výpočtu a výpočtového času. Navíc výsledná hodnota GWP je tímto zjednodušením ovlivněna maximálně v řádech jednotek procent, protože se neuvažují drobné příspěvky jak pozitivní, tak negativní.

Následující obr. 39 ukazuje vliv vybraných tří sub-systémů. Tyto jsou výhradně ovlivněny složením spalovaného odpadu. Dva nejzásadnější parametry, které patří do vlastností odpadu, jsou výhřevnost a obsah fosilního uhlíku. Množství fosilního uhlíku je přímo úměrné environmentální zátěži ze samotného spalování. Na obsah fosilního uhlíku má nejvýraznější vliv množství plastů v SKO. Na obr. 39 jsou znázorněny tři křivky, které se liší podílem plastů v odpadu. Křivka A odpovídá složení z Tab. 4, křivka B má podíl plastů snížen o 2 % a křivka C má podíl plastů zvýšen o 2 %. Podíly ostatních složek odpadu jsou v souladu s tímto upraveny. Druhý důležitý parametr odpadu je jeho výhřevnost. Ta může být odhadnuta na základě výhřevnosti a podílu jednotlivých frakcí. Vyšší podíl frakcí s vysokou výhřevností (např.: plasty, papír) zvyšuje GWP-kredit za vyrobenou elektřinu a teplo. Tento jev (zvýšení výhřevnosti a GWP-kreditu) u plastů jde proti dříve zmíněnému zvýšení obsahu fosilního uhlíku. Toto se v grafu na obr. 39 projeví přibližováním křivek se zvyšujícím se podílem výroby tepla (na úkor elektřiny). Výhřevnosti odpadu pro jednotlivé křivky jsou  $LHV_A = 8,7 \text{ MJ/kg}$ ,  $LHV_B = 8,2 \text{ MJ/kg}$  a  $LHV_C = 9,2 \text{ MJ/kg}$ .



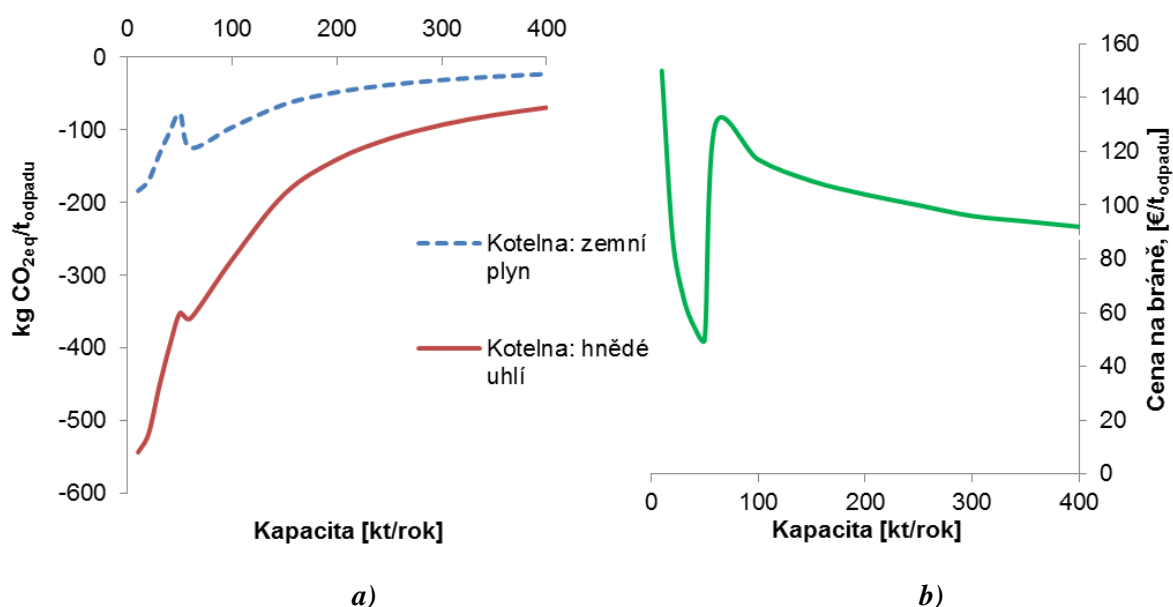
**Obr. 39 EVO: GWP jako funkce procentuálního využití výroby tepla**

Dalším zajímavým parametrem, který má velmi významný vliv na výslednou hodnotu GWP, je podíl vyrobené elektřiny a tepla v zařízení EVO (znám také jako teplárenský modul). Většina jak již stojících, tak uvažovaných zařízení využívá kondenzační odběrovou turbínu. Jak již bylo uvedeno, tak i ve výpočtech je s touto variantou turbíny počítáno. Na obr. 39 je znázorněn vliv použitého režimu kondenzační odběrové turbíny. Na vodorovné ose (osa  $x$ ) jsou znázorněny procenta využití odběru. Hodnota 0 % na ose  $x$  znamená plný kondenzační režim s produkcí tepla pouze pro vlastní spotřebu zařízení. Hodnota 100 % na ose  $x$  značí maximální využití odběru turbíny s minimálním průtokem páry potřebným pro kondenzační stupeň. Jak je patrné z obr. 39, tak s rostoucím využitím odběru (vrůstá výroba tepla) roste množství uspořených  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ . Konkrétní hodnoty pro okrajové body z grafu na obr. 39 jsou přehledně uvedeny v tab. 7. Na obr. 39 je uveden speciální příklad pro moderní zařízení EVO orientující se výhradně na produkci elektrické energie. Výroba elektrické energie se v těchto zařízeních pohybuje v rozmezí 0,6 až 0,8 MWh/ $t_{\text{waste}}$  [23]. V těchto zařízeních jsou aplikována opatření pro maximalizaci výroby elektřiny. Jsou to investičně velmi náročná zařízení. Jak vyplývá z obr. 39, v podmínkách ČR je výhodnější se zaměřit na maximální využití produkovaného tepla.

**Tab. 7 Hodnoty GWP pro body korespondující s okrajovými body v obr. 39**

GWP [kg CO <sub>2eq</sub> /t <sub>odpadu</sub> ]						
	Orientace na produkci elektřiny			Orientace na produkci tepla		
Složení odpadu	A	B	C	A	B	C
Zátěž: spalování	366	317	417	366	317	417
Kredit: produkce elektřiny	-343	-325	-361	-145	-138	-152
Kredit: produkce tepla	-21	-20	-22	-531	-502	-560
Výsledné GWP	2	-28	34	-310	-322	-296

Pokud znalosti získané z úvodu této kapitoly a z obr. 39 využijeme pro posouzení jedné určené lokality, která je definována stanovenou roční poptávkou po teple, pak je možné vyjádřit vliv roční zpracovatelské kapacity na výslednou hodnotu GWP. Na obr. 40a) je uvedena závislost kapacity zařízení a výsledné hodnoty GWP. Výpočet byl proveden pro lokalitu s poptávkou po teple zhruba 370 TJ/r. Dvě křivky na obr. 40a) ukazují vliv nahrazovaného paliva na výslednou hodnotu GWP. Modrá přerušovaná křivka ukazuje hodnoty pro případ, kdy je nahrazena produkce tepla v kotelně na zemní plyn, kdežto červená křivka ukazuje případ náhrady produkce z kotelně na hnědé uhlí, viz emisní faktory v tab. 6. Skok u zpracovatelské kapacity 60 kt/r je zapříčiněn přechodem z technologií malých kapacit na vyšší, viz kapitola 3.3.3. Hlavní vliv má přechod z PT na KOT. Tato křivka pak slouží jako nový vstup do nástroje NERUDA a slouží jako ekologické kritérium. Obdobný princip vstupu již NERUDA využívá pro ekonomický popis zařízení EVO, viz obr. 40b a kapitola 3.3.4, tzv. křivka závislosti ceny na bráně na kapacitě zařízení. Z výsledků je patrné, že s rostoucí kapacitou klesají ušetřené CO<sub>2eq</sub>, což je negativní trend. Pro porovnání slouží křivka ceny za zpracování odpadu na bráně zařízení obr. 40b), která má s rostoucí kapacitou klesající tendenci. V tomto případě je to trend pozitivní. Porovnání ukazuje, že environmentální benefity jdou proti těm ekonomickým a implikuje potřebu problém řešit optimalizačním modelem zohledňujícím různé lokality a dopravu odpadu.



**Obr. 40 Závislost mezi GWP a kapacitou (a) a mezi cenou na bráně a kapacitou (b), upraveno na základě [53]**

Pro výpočet GWP pro zařízení EVO je tedy zapotřebí znát tyto hlavní vstupy:

- Složení odpadu
- Parametry provozu zařízení EVO – produkce elektřiny a tepla
- Parametry provozu zdrojů, které má EVO nahradit – emisní faktor  $\text{CO}_2$ .

Vstupem do nástroje NERUDA je pak křivka závislosti GWP na kapacitě zařízení.

### 4.3 GWP – SKLÁDKOVÁNÍ

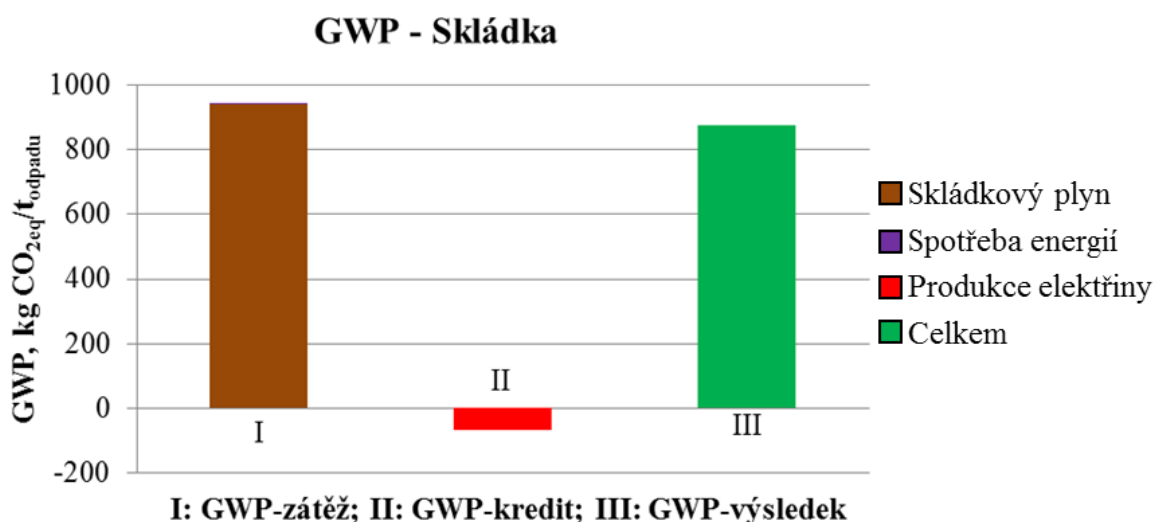
Tato kapitola se věnuje druhému způsobu nakládání s SKO, pro který byl sestaven výpočtový model v prostředí MS Excel, a tím je skládkování.

Na rozdíl od předchozího způsobu nakládání s odpadem (EVO) je pro skládkování důležitým parametrem obsah biogenní složky. Při skládkování bio-složky (celkově přes 30 % SKO, např.: papír, odpad z jídla, tráva, dřevo atd.) anaerobní bakterie degradují biologické materiály za produkce metanu ( $\text{CH}_4$ ) a oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ). Emise  $\text{CO}_2$  nejsou započítávány do výsledného GWP, protože jsou součástí přírodního oběhu uhlíku, viz úvod kapitoly 4. Jinak je tomu u emisí  $\text{CH}_4$ , které již započítávány jsou, přestože původ uhlíku je převážně biologický.  $\text{CH}_4$  vzniká díky anaerobnímu prostředí skládky, které je vytvořeno člověkem (antropogenní původ) a v přírodě by k tomuto jevu nedošlo. Tvorba skládkového plynu se pohybuje kolem hodnoty  $210 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{odpadu}}$  [57] a [62]. Tato hodnota je použita i ve výpočtech v této práci.

Nejvýznamnějším parametrem skládky, který ovlivňuje celkové množství skleníkových plynů vypuštěných do ovzduší a výslednou hodnotu GWP, je poměr úniku a zachytu skládkového plynu. Zachyt skládkového plynu se u zařízení pohybuje v širokém rozmezí od 50 % do téměř 100 % [15]. Ve výpočtech v této práci je pak zvolena konstantní hodnota zachytu 60 % vznikajícího skládkového plynu. Z obvyklého složení skládkového plynu tvoří 50 až 60 %  $\text{CH}_4$ , jehož GWP je počítán jako 28mi násobek 1 kg  $\text{CO}_2$ . Dalších zhruba 30 až 40 % tvoří samotné  $\text{CO}_2$  a zbytek jednotek procent doplňují stopové příměsi různých plynů (např.: kyslík, oxid dusný, amoniak, vodík, organické látky atd.). Poměr složení  $\text{CH}_4$  :  $\text{CO}_2$  je variabilní a kolísá nejen mezi jednotlivými skládkami, ale i na jedné skládce v čase. V práci je zvolena fixní hodnota 55 %  $\text{CH}_4$  ve skládkovém plynu. Množství  $\text{CH}_4$  obsaženého v unikajícím plynu se počítá použitím molárního objemu plynu (uvažována hodnota pro ideální plyn  $22,414 \text{ m}^3/\text{kmol}$ ). Z hodnoty tvorby skládkového plynu na tunu odpadu dopočítáme molární množství vznikajícího plynu a následně přes poměr zachytu (viz kapitola 1.2.1) a procentuální zastoupení  $\text{CH}_4$  v plynu určíme výsledné množství v  $\text{kg}/\text{t}_{\text{odpadu}}$ . Toto množství je následně vynásobeno koeficientem GWP a je získán výsledek v jednotkách  $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{t}_{\text{odpadu}}$ .

V následujícím grafu na obr. 41 je pak přehledně znázorněn výsledek výpočtu negativních i pozitivních faktorů ovlivňujících GWP pro modelovou variantu skládky SKO. Jednotlivé barvy v grafu značí:

- I Zátěže:
  - Hnědá: GWP koresponduje s množstvím uniklého skládkového plynu do ovzduší. Hodnota platí pro zachyt 60%. Pro skládku bez odplynění by hodnota dosáhla až k 2350 kg CO<sub>2eq</sub>/t<sub>odpadu</sub>.
  - Fialová: Nepatrný negativní vliv má spotřeba energie pro zachyt a zacházení se skládkovou vodou a výluhem. V tomto je započítán i nepatrný negativní přínos provozu strojů na skládce (kompaktor). Součet těchto zátěží je marginální v řádech jednotek a dále v práci nebude uvažován [63].
- II Kredity:
  - Červená: Množství CO<sub>2eq</sub> ušetřené při produkci elektřiny ze zachyceného skládkového plynu oproti množství, které by bylo vyprodukováno z primárních zdrojů. V úvahu je brán energetický mix ČR pro výrobu elektřiny [27]. Výroba elektřiny je uvažována zhruba 360 MJ/t<sub>odpadu</sub> [63].
- III Výsledek:
  - Výsledná hodnota po sečtení environmentálních zátěží a kreditů. V modelovém příkladu je výsledná hodnota kladná, což značí produkci zhruba 880 kg CO<sub>2eq</sub>/t<sub>odpadu</sub>.



**Obr. 41 Skládka - Graf průměrné roční GWP vztažené na 1 tunu odpadu, stupeň odplynění skládky 60%**

Pro účely výpočtu GWP pro zjednodušené LCA proto stačí odhad průměrného složení. Vzhledem k minimálnímu dopadu ostatních parametrů při zjednodušeném výpočtu LCA je v této práci celkové GWP počítáno pouze z uniklého skládkového plynu, viz hnědý sloupec na obr. 41. Do nástroje NERUDA pak výsledné GWP skládkování vstupuje jako konstanta nezávislá na kapacitě zařízení.

Pro výpočet GWP pro skládky SKO je tedy zapotřebí znát tyto hlavní vstupy:

- Odhad tvorby skládkového plynu



- Odhad složení skládkového plynu
- Záchyt skládkového plynu.

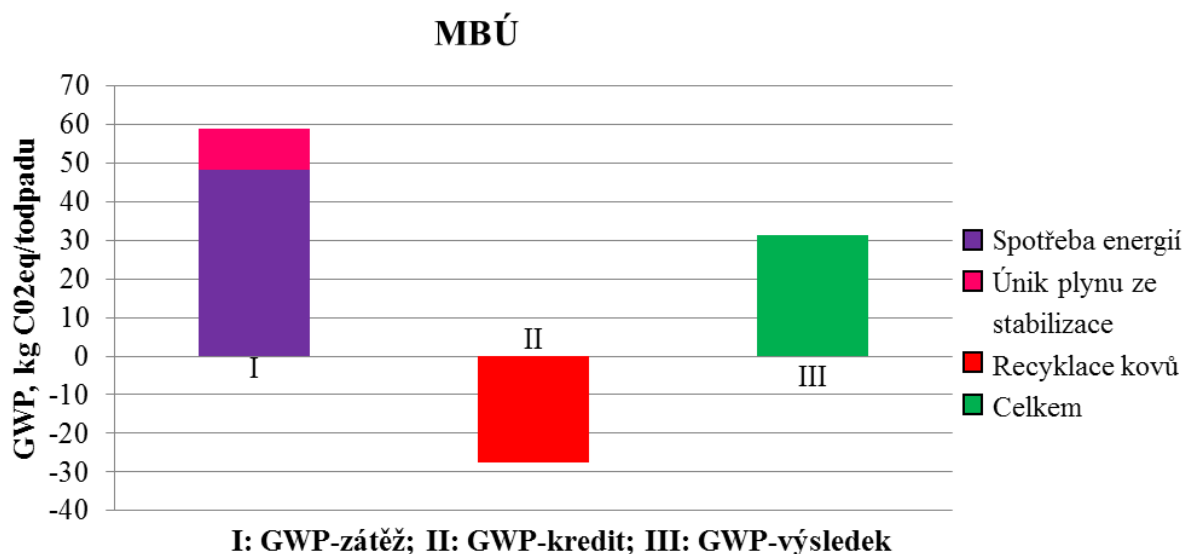
#### 4.4 GWP – MECHANICKO-BIOLOGICKÁ ÚPRAVA

Zařízení MBÚ nejsou v ČR prozatím rozšířená, proto většina dat pro tento druh nakládání s odpady byla získána ve spolupráci se společnostmi bifa a ze zahraničních zdrojů [64], [65], [66] a [67].

Zařízení MBÚ mají za úkol snížit množství SKO ukládaného na skládky. Toho je dosaženo mechanickým roztríděním SKO na výhřevnou frakci, ze které je pak vyráběno alternativní palivo, a biologicky stabilní frakci vhodnou ke skládce. Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.2.2 existuje značné množství technologických uspořádání zařízení MBÚ. Od jednoduchých zařízení, kde probíhá pouze mechanické třídění (MÚ), po zařízení s biologickou (MBÚ, MBS) nebo fyzikální stabilizací (MFÚ). Každá z variant se dále liší dle vstupního složení odpadu a dle možného odbytu výstupních materiálů [64]. Dále v této kapitole budou pro výpočet GWP ukázány dva příklady a to jednoduchá MÚ bez stabilizace výstupní frakce odpadu a obvyklé MBÚ s biologickou stabilizací odpadu. U obou případů pak bude docházet k výrobě TAP. Složení pro TAP bude pro zjednodušení modelů uvažováno stejné a to dle tab. 5. V závislosti na způsobu využití TAP buď v monoblocích (zařízení EVO uzpůsobené pro spalování TAP) nebo cementárnách budou doplněny GWP výpočty pro zařízení MBÚ.

V následujícím grafu na obr. 42 je pak přehledně znázorněn výsledek výpočtu negativních i pozitivních faktorů ovlivňujících GWP pro modelovou variantu zařízení MBÚ, viz obr. 6. Jednotlivé barvy v grafu značí:

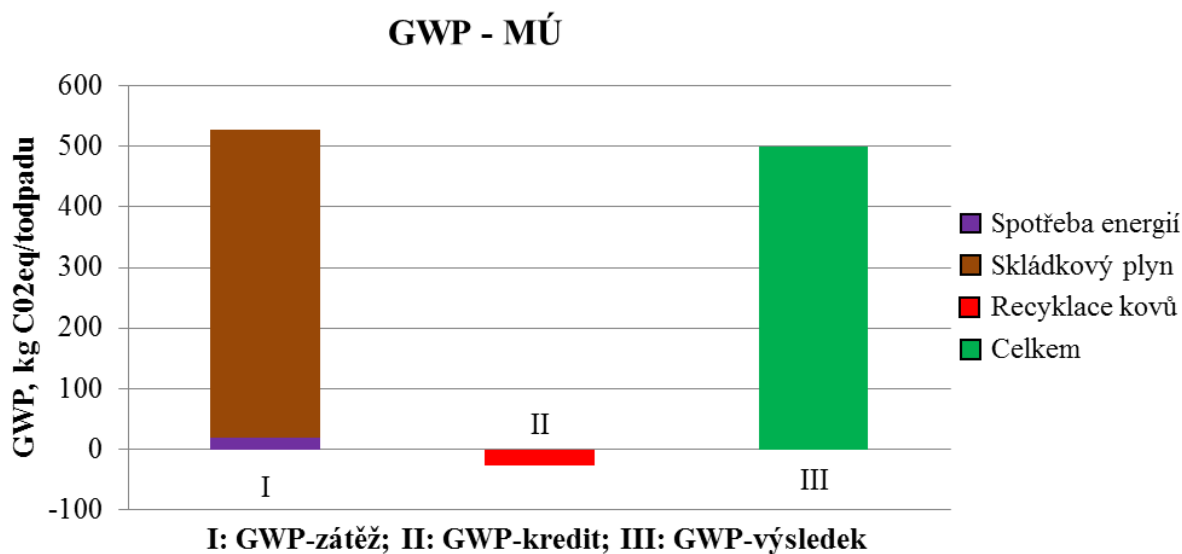
- I Zátěže:
  - Fialová: Množství  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ , které vzniká při produkci energie z primárních zdrojů pro vlastní spotřebu zařízení. Spotřeba energií v zařízení MBÚ je zhruba následující [65], [66]: 175 MJ/t<sub>odpadu</sub> elektrické energie, 60 MJ/t<sub>odpadu</sub> tepla, 30 MJ/t<sub>odpadu</sub> jako mechanická energie a 160 MJ/t<sub>odpadu</sub> v zemním plynu.
  - Růžová: Množství skleníkových plynů vyjádřeno v  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  obsažených ve výstupním plynu z biologické stabilizace. Produkce plynu je zhruba 5500 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/t<sub>odpadu</sub>. Obsah GWP-negativních složek po průchodu systémem čištění je 5,8 mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub> CH<sub>4</sub> a 6 mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub> NO<sub>2</sub>.
- II Kredity:
  - Červená: Recyklace kovů a množství  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  ušetřené oproti výrobě z primárních surovin. Množství je zhruba 15 kg železných a neželezných kovů dohromady.
- III Výsledek:
  - Výsledná hodnota po sečtení environmentálních zátěží a kreditů. V modelovém příkladu je výsledná hodnota kladná, což značí produkci zhruba 32 kg  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ /t<sub>odpadu</sub>.



**Obr. 42 MBÚ - Graf průměrné roční GWP vztaženého na 1 tunu odpadu**

Pro porovnání je v následujícím grafu na obr. 42 přehledně znázorněn výsledek výpočtu negativních i pozitivních faktorů ovlivňujících GWP pro modelovou variantu zařízení MÚ (bez stabilizace), viz obr. 7. Jednotlivé barvy v grafu značí:

- I Zátěže:
  - Fialová: Množství CO<sub>2eq</sub>, které vzniká při produkci energie z primárních zdrojů pro vlastní spotřebu zařízení. Spotřeba energií v zařízení MÚ je o něco menší než v klasickém MBÚ [65], [66]: 70 MJ/t<sub>odpadu</sub> elektrické energie, 55 MJ/t<sub>odpadu</sub> tepla, 30 MJ/t<sub>odpadu</sub> jako mechanická energie.
  - Hnědá: Vzhledem k tomu, že frakce určená na skládku není stabilizována, k zátěžím přibývá i ta, která koresponduje s množstvím uniklého skládkového plynu do ovzduší (obdobně jako u skládek).
- II Kredity:
  - Červená: Recyklace kovů a množství CO<sub>2eq</sub> ušetřené oproti výrobě z primárních surovin. Množství je zhruba 15 kg železných a neželezných kovů dohromady.
- III Výsledek:
  - Výsledná hodnota po sečtení environmentálních zátěží a kreditů. V modelovém příkladu je výsledná hodnota kladná, což značí produkci zhruba 500 kg CO<sub>2eq</sub>/t<sub>odpadu</sub>.



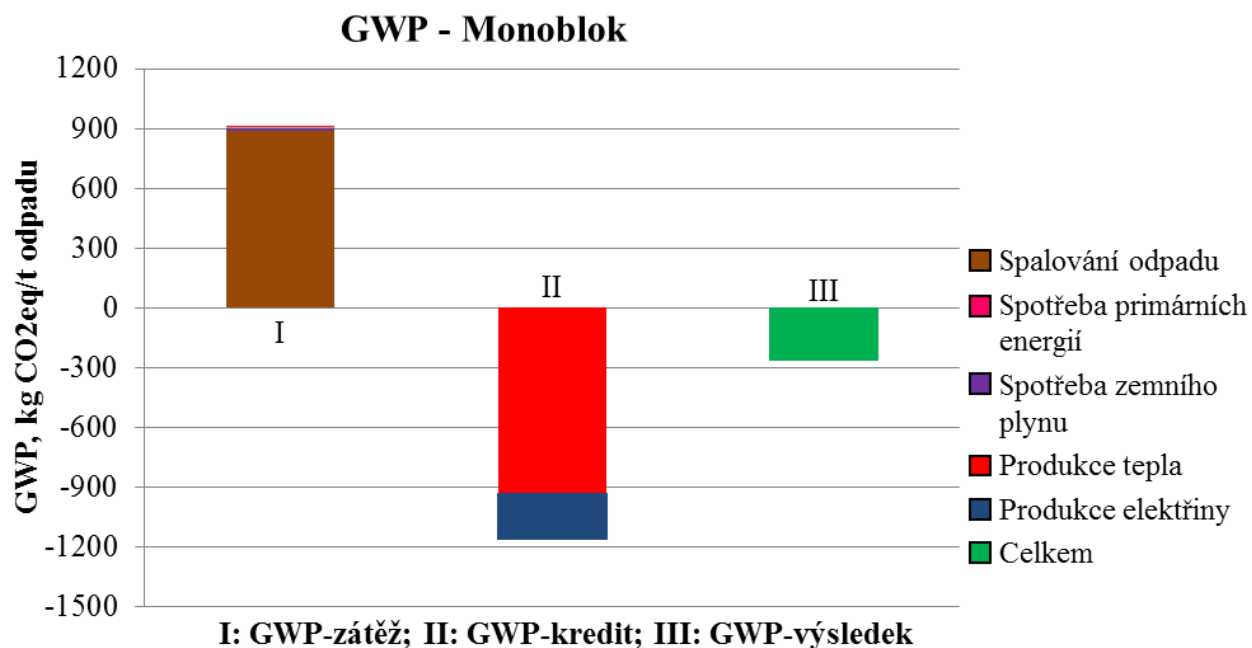
*Obr. 43 MÚ - Graf průměrné roční GWP vztaženého na 1 tunu odpadu*

Zjednodušené LCA pak pro samostatné technologie MBÚ pracuje s následujícími parametry:

- Spotřeba energií na zpracování tuny odpadu – elektřina, teplo, mechanická energie.
- Spotřeba zemního plynu.
- Emise plynů z MBÚ procesů – složení a množství.
- Množství recyklovaných kovů.

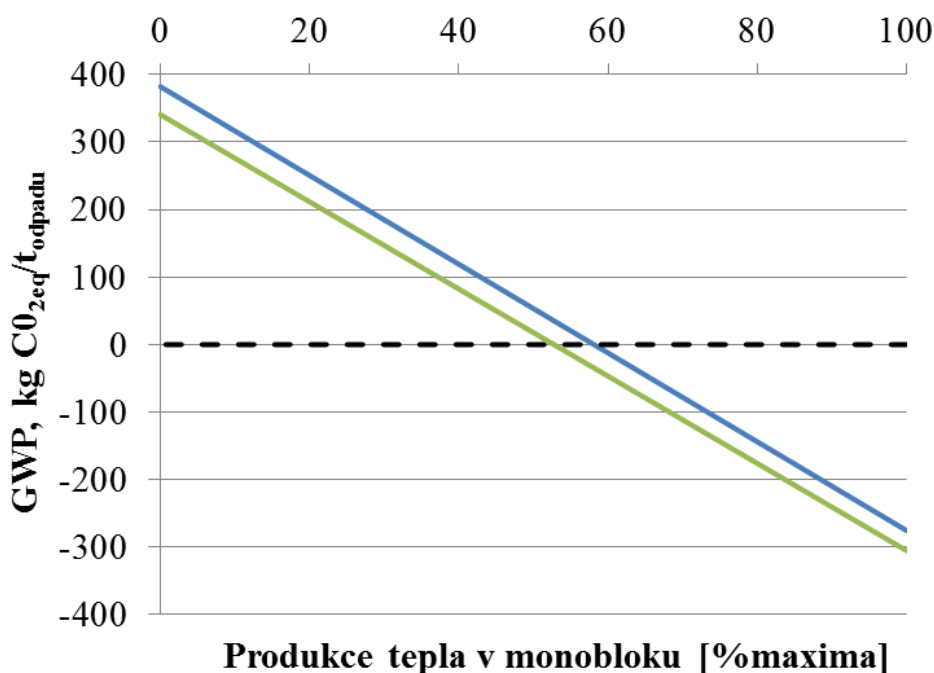
#### **4.5 GWP – VYUŽITÍ TUHÝCH ALTERNATIVNÍCH PALIV**

Předchozí grafy ukazují samostatnou jednotku MÚ a MBÚ bez následného využití vyrobených TAP. Environmentální dopad využití TAP je analyzován v této kapitole. Hlavní variantou, se kterou následně pracuje i NERUDA jsou zařízení označené jako monobloky. Jedná se obdobná zařízení jako EVO, ale přizpůsobené ke spalování výhřevnějšího materiálu. Ke stanovení GWP pro monobloky zpracovávající TAP jsou hlavní stejné parametry jako u zařízení EVO. Nejvýznamnějším parametrem jak na straně kladů, tak záporů je výroba energie, tedy samotné využití TAP. Jako záporná je uvažována produkce oxidu uhličitého při spalování TAP a jako kredit je vnímána náhrada fosilních paliv při produkci elektřiny a tepla. Oproti klasickému zařízení EVO je vliv těchto tří parametrů zvýrazněn díky podstatně vyššímu zastoupení fosilního uhlíku v TAP a díky vyšší výhřevnosti paliva, viz obr. 44. Modelová varianta je určena pro zařízení o kapacitě 100 kt/r, s průměrnou roční produkcí tepla 8,46 GJ/t<sub>odpadu</sub> a produkcí elektrické energie 0,44 MWh/t<sub>odpadu</sub>.



**Obr. 44 Monoblok - Graf průměrné roční GWP vztaženého na 1 tunu odpadu**

Na následujícím obrázku obr. 45 je znázorněna obdobná závislost výsledného GWP na režimu výroby energie jako v případě zařízení EVO na obr. 39. Z grafu je patrné, že vzrostl negativní vliv na GWP ze zvýšeného obsahu fosilního uhlíku v palivu (TAP) oproti SKO. V grafu jsou uvedeny dvě křivky pro dvě varianty parametrů vyráběné páry. Modrá křivka je stanovena pro obvyklé parametry vyráběné páry (400 °C a 4 MPa) a zelená je určena pro zvýšené parametry na 6 MPa. Tento jev výrazně převyšuje pozitivní efekt náhrady primárních zdrojů díky zvýšené výhřevnosti paliva. Navíc jsou monobloky mnohem více náchylné na provozní režim a poměr výroby elektřiny a tepla. Pokud se dostaneme pod hodnotu 60 % z maximální možné dodávky tepla, tak se hodnota GWP přehoupne přes environmentálně neutrální nulu a zařízení již nešetří emise skleníkových plynů, ale naopak přispívá ke zhoršování životního prostředí. Navíc je pro celkový pohled nutné zohlednit negativní efekt MBÚ, ve kterém je TAP vyprodukovaný.



*Obr. 45 Monoblok: GWP jako funkce procentuálního využití výroby tepla*

Pro výpočet GWP monobloků je tedy zapotřebí znát obdobné parametry jako v případě zařízení EVO a jsou to tyto hlavní vstupy:

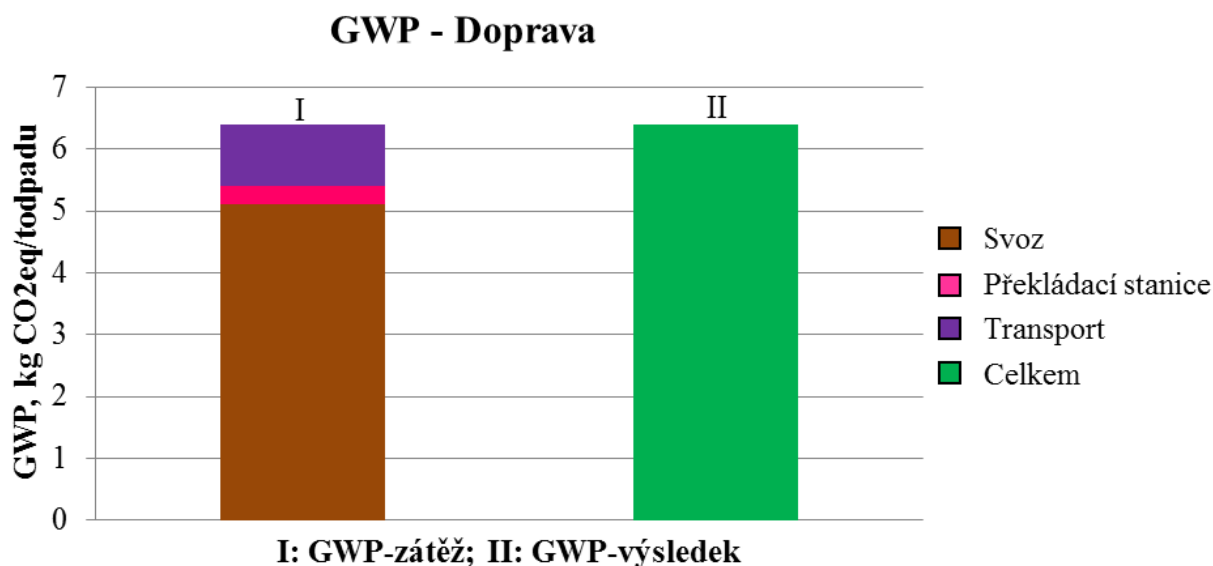
- Složení vstupního paliva (TAP)
- Parametry provozu monobloku – produkce elektřiny a tepla
- Parametry provozu zdrojů, které má EVO nahradit – emisní faktor CO<sub>2</sub>.

#### 4.6 GWP – DOPRAVA

Dopravu odpadu můžeme rozdělit na dvě části a to samotný svoz jednotlivých popelnic (dále jen svoz) a pokud je zařízení vzdáleno od místa svozu tak i přepravu k zařízení (dále jen transport). V takovém případě přichází v úvahu i budování překládacích stanic. Vhodné vzdálenosti pro různé kombinace způsobů dopravy jsou analyzovány například v [35].

V příkladu na obrázku je pro svoz popelářským vozem uvažována dopravní vzdálenost 70 km a množství přepravovaného odpadu jedním popelářským vozem je 10 t. Pro transport je uvažována dopravní vzdálenost 50 km a množství přepravovaného odpadu jednou soupravou je 24 t. Emisní faktory skleníkových plynů pro nákladní dopravu po přepočítání na GWP ekvivalenty jsou u svozu pro CO<sub>2</sub> 770 g CO<sub>2eq</sub>/km, pro CH<sub>4</sub> 2 g CO<sub>2eq</sub>/km, pro N<sub>2</sub>O 8 g CO<sub>2eq</sub>/km a u transportu pro CO<sub>2</sub> 600 g CO<sub>2eq</sub>/km, pro CH<sub>4</sub> 2 g CO<sub>2eq</sub>/km, pro N<sub>2</sub>O 7 g CO<sub>2eq</sub>/km [68]. Z emisních faktorů je zřejmé, že na výslednou hodnotu GWP má vliv pouze produkce CO<sub>2</sub>. Hodnoty GWP od ostatních skleníkových plynů se i po započtení koeficientů (tab. 3) pohybují o dva řády níže. Výsledky z grafu na obr. 46 ukazují, že převážná část produkce GWP připadá na svoz jako takový (hnědá část v grafu). Transport má potom jen nepatrný vliv na celkovou produkci GWP (fialová část). Růžová část v GWP zátěži je pak produkce skleníkových plynů při překládání odpadu z popelářských vozů na nákladní soupravy. Celková produkce skleníkových plynů při dopravě odpadu je tedy zhruba 6 kg

CO<sub>2eq</sub>/t<sub>odpadu</sub>. Toto je zanedbatelné vůči účinkům, kterých lze dosáhnout efektivní integrací EVO do CZT, viz obr. 39 a obr. 45.



*Obr. 46 Doprava - Graf GWP vztaženého na 1 tunu odpadu*

Vliv dopravy je oproti produkci GWP ze samotných technologií marginální a navíc je pro všechny zařízení téměř totožný (vždy se musí svézt jednotlivé popelnice) a proto je z těchto důvodů v globálním výpočtu v nástroji NERUDA dále zanedbán. Navíc díky tomuto zjednodušení dochází i ke zrychlení výpočtu při řešení rozsáhlých a komplexních scénářových úloh.

## 4.7 ŘETĚZEC ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ

V této kapitole jsou spojeny předchozí výpočty GWP (kapitoly 4.2 až 4.6) a stanoveno výsledné roční vyhodnocení pro jednu příkladovou obec. Produkce SKO pro tuto obec je zvolena 10 000 t/r. Jsou zvoleny tři základní a jeden kombinovaný řetězec zpracování odpadů. Tři základní jsou navrženy podle uvažovaných druhů nakládání s SKO (I = EVO, II = MBÚ s využitím TAP, III = skládka). Ke každému je připočítán vliv dopravy a to nejen SKO do zařízení, ale i zbytkových a vyprodukovaných materiálů. Odhad dopravních vzdáleností byl publikován například v [69]. Dopravované vzdálenosti jsou záměrně voleny delší než průměrné. Kombinovaný řetězec je pak navržen tak, že 50 % SKO jde do zařízení EVO a 50 % končí na skládce (IV = EVO + skládka). Ujetá vzdálenost popelářským vozem při svozu SKO je uvažována 70 km. Vzdálenosti jednotlivých zařízení od uvažované obce jsou definovány následovně:

- Obec ↔ zařízení EVO = 60 km
- Obec ↔ skládka = 40 km
- Obec ↔ MBÚ = 40 km
- MBÚ ↔ monoblok = 60 km
- EVO ↔ skládka = 70 km.

Každý řetězec je rozdělen na základní operace a pro ty je určen environmentální dopad pomocí GWP. Například zpracování odpadu v EVO je rozděleno na svoz odpadu, transport odpadu, spotřebu primárních energií, spotřebu zemního plynu, transport škváry a popílku, recyklace kovů, spalování SKO a produkce energií. Detailní výsledky výpočtu jsou uvedeny v příloze č. 5. GWP je určeno pro jednotlivé operace a následně vyhodnoceno celkově. Celkové vyhodnocení je provedeno jak pro variantu se započítanou dopravou, tak pro variantu bez dopravy. Po porovnání je dopočten procentuální podíl dopravy na celkové hodnotě GWP. Hlavní výsledky jsou pak uvedeny v tab. 8.

**Tab. 8 Výsledné hodnoty GWP pro řetězce zpracování odpadů**

Řetězec		GWP [kg CO <sub>2eq</sub> /r]		Podíl dopravy [%]
		Celkem s dopravou	Celkem bez dopravy	
<b>I</b>	<b>EVO</b>	-1 464 847	-1 537 047	4.7%
<b>II</b>	<b>MBÚ + TAP</b>	-456 325	-525 025	13.1%
<b>III</b>	<b>Skládka</b>	8 853 116	8 789 216	0.7%
<b>IV</b>	<b>EVO + skládka</b>	3 694 134	3 626 084	1.9%

Z výsledků (tab. 8) je zřejmé, že doprava má malý vliv u zpracování odpadu v zařízení EVO (řetězec I) a v kombinovaném případě zařízení EVO a skládky (řetězec IV). Téměř nulový je vliv dopravy na GWP při ukládání odpadu na skládku (řetězec III). Výraznější vliv dopravy je zaznamenán při zpracování odpadu v zařízení MBÚ s následným využitím TAP. Toto je dáno jednak sníženým vlivem spalování TAP, protože zpracováním v MBÚ vznikne z jedné vstupní tuny SKO pouze 0,32 t TAP, viz obr. 6. Druhá příčina zesíleného vlivu dopravy v řetězci II je samotné navýšení objemu dopravy, protože je zapotřebí odvést TAP do zařízení k energetickému využití (monoblok). Jak je patrné z výsledků uvedených v příloze č. 5 a na obr. 46 převážnou část až 80 % z veškeré přepravy zaujímá svoz SKO. I v případě řetězce II zaujímá svoz přes 70 %. Svoz odpadu je nutná součást OH a nelze ho ovlivnit polohou zařízení vůči producentovi. Co však ovlivnit polohou a kapacitou zařízení jde je režim provozu energetických zařízení ke zpracování odpadů. Cílem z pohledu snížení produkce skleníkových plynů je navrhnout polohu zařízení EVO a monobloků tak, aby fungovaly v režimu maximální dodávky tepla.

## 5 GWP V NÁSTROJI NERUDA

V této části práce je popsán způsob implementace ekologického hlediska do nástroje NERUDA pro optimalizaci rozložení zpracovatelských kapacit EVO v rámci ČR. Do této doby udávala účelová funkce veškeré náklady spojené s nakládáním s odpadem. Podrobně je popsána Šomplákem v [28]. Optimalizační hledisko tedy bylo minimalizovat celkovou cenu za zpracování odpadu na všech zařízeních, které byly nástrojem navrženy.

### 5.1 SYSTÉM EVROPSKÉHO OBCHODOVÁNÍ S EMISNÍMI POVOLENKAMI

V návaznosti na výsledky z předcházející kapitoly bylo jako ekologické hledisko pro NERUDA vybráno hodnocení množství skleníkových plynů vyprodukovaných, nebo naopak uspořených pomocí efektivního návrhu systému odpadového hospodářství a optimální výroby energií v zařízeních EVO. Emise skleníkových plynů jednotlivých způsobů nakládání s odpady jsou vyjádřeny pomocí parametru GWP. Jednotkou tohoto parametru je  $\text{kg CO}_{2\text{eq}}$ . Parametr byl vybrán, protože emise skleníkových plynů patří k hlavním ekologickým zátěžím ze sektoru výroby energií a nakládání s odpadem, a zároveň je možné tento parametr ekonomicky vyjádřit.

V roce 2003 vydal Evropský parlament směrnici o vytvoření systému pro obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů (ETS z anglického Emissions Trading System) [70]. ETS byl poprvé představen v roce 2005 a nyní se nachází ve své třetí fázi (2013 až 2020). Předpisy pro čtvrtou fázi jsou stále ve vývoji, ale již lze odhadovat možný budoucí vývoj na základě přijatých opatření v Evropském parlamentu. V průběhu jednotlivých fází byl ETS postupně rozšiřován o další odvětví a zařadil do emisí i jiné skleníkové plyny než jen  $\text{CO}_2$ . V současnosti jsou v ETS zahrnuty energetická zařízení, rafinérie, letectví a výrobní průmysl (např.: zpracování železa, cementárny, papírny, výroba hliníku a další). ETS je tzv. „cap and trade“ systém. Tento systém tedy pro země Evropské unie stanovuje celkový limit pro emise skleníkových plynů pomocí přerozdělených emisních povolenek. Přebytké nebo uspořené povolenky potom mohou být obchodovány na burze. Současná cena se pohybuje těsně pod hranicí 5 €/t $\text{CO}_{2\text{eq}}$ . Podrobný popis fungování ETS je popsán v [71].

ETS dlouhodobě trpí přebytkem povolenek, což zapříčinilo pád ceny pod 5 €. Nízká cena a všeobecně vývoj ETS by nevedl ke splnění cílů Evropské unie, které jsou nově uvedeny v návrhu nařízení Evropského parlamentu a rady [72]. Návrh počítá se snížením emisí pro sektor ETS v porovnání s rokem 2005 o 43 % a pro odvětví, na něž se systém ETS nevztahuje, o 30 %. Pro splnění těchto cílů a znovu oživení trhu s povolenkami vydala EU návrh na změnu směrnice o systému pro obchodování s emisemi [73]. Opatření navržená v [72] a [73] měla vést k postupnému růstu ceny emisních povolenek a stabilizaci trhu. Mezi nejdůležitější opatření patří každoroční snižování emisního stropu o 2,2 % (dříve 1,74 %). Dále průběžné stahování přebytkých emisních povolenek počínaje rokem 2019. Další zajímavostí jsou i úvahy o rozšíření ETS o další odvětví (např.: zpracování odpadu, doprava, stavebnictví, nebo zemědělství). První využití sektoru mimo ETS pro obchodování s emisními povolenkami je již uvedeno v [72]. Všechny členské státy budou moci využít kredity udělené za zalesňování (do celkového limitu 280 milionů), ale jen 9 zemí bude moci zrušit 100 milionů ETS emisních povolenek jako kompenzaci za emise v sektorech mimo EU ETS.



Popsaný vývoj a přijatá opatření v EU vedli autora k využití parametru GWP jako ekologického kritéria v nástroji NERUDA a jeho ekonomickém vyjádření pomocí ceny emisních povolenek.

## 5.2 VÝPOČET V NÁSTROJI NERUDA

Ukázkový výpočet v nástroji NERUDA byl sestaven pro návrh zařízení pro zpracování SKO v celé ČR. Výpočet probíhal pro různé scénáře vývoje skládkovacího poplatku a ceny emisních povolenek. Cílem bylo ověřit vliv nového ekologického kritéria na výsledky a ukázat jakým směrem by se odklonil tok odpadu při měnící se váze ekologického kritéria, která je definována cenou emisních povolenek, a jaký by to mělo vliv na celkové náklady na zpracování SKO.

Před samotným výpočtem byl proveden návrh a nastavení sítě odpadového hospodářství. Jako předmětný odpad je uvažován pouze SKO. Množství produkováného a zpracovávaného odpadu je cca 2 mil tun ročně. Složení odpadu je uvedeno v tab. 4. Data o produkci a složení vychází z datové základny softwaru Justine a odpovídají roku 2016 (V softwaru Justine byla provedena predikce budoucího vývoje až do roku 2024 vzhledem k tomu, že množství i složení SKO se příliš nemění, nemá volba použitého roku podstatný vliv na výsledky názorného výpočtu).

Pro výpočet je uvažováno 31 potenciálních lokalit pro zařízení EVO. Z tohoto počtu jsou 4 zařízení již stojící – Praha, Brno, Liberec, Plzeň. Ostatní jsou rozmístěny dle zmíněných alternativ zařízení v plánech odpadového hospodářství jednotlivých krajů. U většiny případných nových EVO NERUDA rozhoduje mezi variantou buď malé, nebo velké spalovny, viz kapitola 3.3. Celková možná kapacita všech zařízení převyšuje uvažovanou produkci SKO. Cena za zpracování odpadu na bráně zařízení je z Flexi stanovena křivkovou závislostí na kapacitě, viz kapitola 3.3.

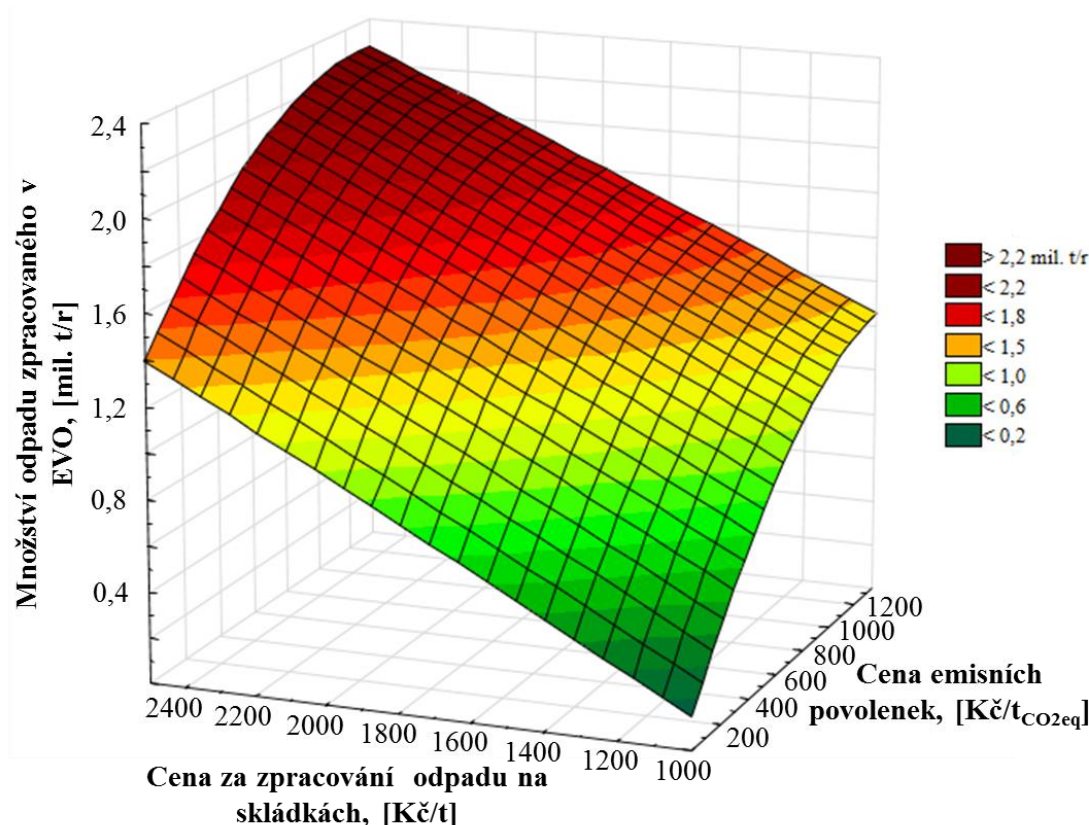
Skládek je ve výpočtu uvažováno 146. Jsou to v současnosti všechny provozované skládky ostatních odpadů S-OO. Maximální roční zpracovatelská kapacita skládky je omezena na 200 kt/rok a je nastavena jednotně pro všechny uvažované. Cena za zpracování odpadu na skládkách je opět jednotná a ve výpočtech je uvažována jako jeden ze scénářů, kdy byla celková cena za zpracování volena z intervalu 1000 až 2500 Kč.

Případná zařízení MBÚ jsou rozmístěna v lokalitách, kde již existuje skládka. Tzn. ve výpočtu je 146 regionů s potenciálem výstavby MBÚ. Cena za zpracování odpadu je stanovena jako závislost na kapacitě zařízení z T-E modelu MBÚ (vypracován na pracovišti UPI).

Cena emisních povolenek je uvažována z intervalu 0 až 1350 Kč/t<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub> (0 až 50 €/t<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub>). Cena je ve výpočtu zahrnuta v účelové funkci a vystupuje jako váha ekologického kritéria.

Úpravy samotného výpočtu v prostředí GAMS probíhaly v širším týmu na pracovišti UPI. Hlavní úpravou zdrojového kódu bylo přidání dopočtu GWP jednotlivým způsobům nakládání s odpady dle vstupů popsaných v kapitole 4. Pro zařízení EVO a monobloky bylo GWP určováno z křivky závislosti GWP na kapacitě, která byla pro potřeby výpočtu v GAMSu linearizována. Potřebu linearizace křivek závislostí ceny na bráně (a potažmo i GWP) na kapacitě zařízení popisuje ve své dizertační práci Šomplák [28]. GWP pro zařízení MBÚ a skládky je určováno jako konstanta, viz kapitola 4.

Interpretace výsledků výpočtu je poněkud složitá a závisí především na požadavcích a cíli zadavatele. Pro uvažovaný názorný příklad je vybrán graf na obr. 47. V tomto grafu je znázorněna závislost množství SKO zpracovaného v zařízeních EVO (svislá osa) v závislosti na zvyšující se ceně skládkovacího poplatku (ekonomické kritérium) a rostoucí ceně emisních povolenek (ekologické kritérium). Z výsledků vyplývá, že s rostoucí cenou emisních povolenek (zvyšování váhy ekologického kritéria) přibývá množství SKO zpracovaného v EVO. Toto je díky jejich ekologické výhodnosti (z pohledu GWP) oproti skládkám i MBÚ, viz kapitola 4.

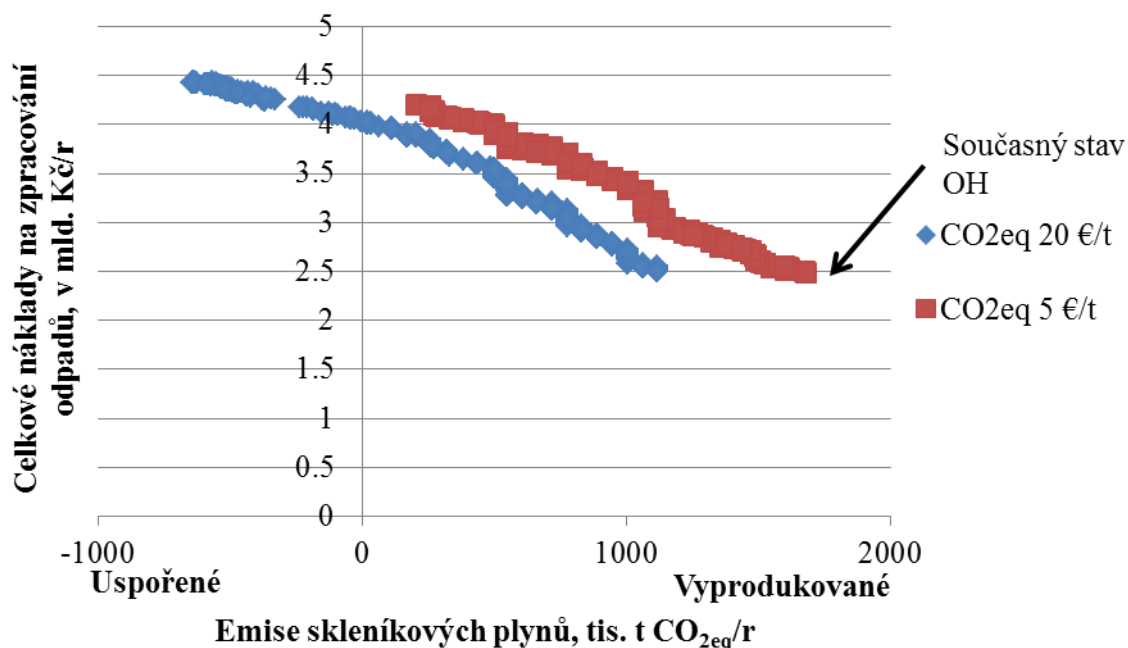


**Obr. 47 Výsledky výpočtu NERUDA: množství odpadu zpracovaného v EVO v závislosti na ceně emisních povolenek a skládkovacího poplatku**

Na druhé straně rostoucí cena za zpracování na skládkách ukazuje, jaké by byly potřebné náklady na zpracování odpadů, aby došlo k odklonění od skládkování. Například pro případ neuvažování ekologického kritéria jsou pro cenu za zpracování na skládce 2500 Kč/t (včetně zvýšeného skládkovacího poplatku) pouze dvě třetiny odpadu zpracovány v zařízeních EVO, viz obr. 47 a nulová hodnota emisních povolenek.

Ekologické kritérium v závislosti na celkové ceně za zpracování odpadů (nebo naopak) může být ilustrováno i grafem na obr. 48. Graf ukazuje průměrné výsledné náklady na zpracování SKO pro různý dopad na životní prostředí vyjádřený produkcí, nebo úsporami emisí skleníkových plynů. V grafu napravo od vertikální osy je OH v režimu produkce skleníkových plynů (převažující skládkování), naopak nalevo je OH v režimu úspory. Rozdílné hodnoty pro různé ceny emisních povolenek (modré a červené body) jsou zapříčiněny uvažováním jejich ceny v účelové funkci nástroje NERUDA. Vyšší ceny emisních povolenek dovolují optimalizaci využít zařízení EVO již při nižším poplatku na bráně, než v případě, kdy by skládky nebyly penalizovány a zařízení EVO zvýhodňovány

cenou emisní povolenky. Toto odpovídá uspořeným nebo vyprodukovaným emisím skleníkových plynů podle výpočtů uvedených v kapitole 4



**Obr. 48 Výsledky výpočtu NERUDA: závislost celkových nákladů na zpracování SKO na emisích skleníkových plynů**

Současný stav OH je téměř totožný s pravým koncem červené křivky v grafu na obr. 48. Odhad produkce skleníkových plynů je zhruba 1,8 mil. t<sub>CO2eq</sub>/r při průměrné ceně za zpracování SKO cca 1250 Kč/t. Optimálním nastavením systému a preferencí zařízení EVO s vysokým podílem dodávky tepla lze uspořit až 2,5 mil. t<sub>CO2eq</sub>/r. Průměrná cena za zpracování SKO by v takovém případě byla asi 2300 Kč/t. Při uvedené úspoře a produkci SKO 200 kg/os a rok znamená přechod na ekologičtější formu OH zvýšení průměrných nákladů o 210 Kč/obyvatele a rok.

## 6 ZÁVĚR

Hlavním nástrojem k efektivnímu využití komunálních odpadů v energetice jsou tzv. zařízení na energetické využití odpadů (EVO). Princip EVO spočívá ve spalování odpadu s následnou výrobou elektřiny a tepla. Vzhledem k povaze tohoto zařízení je k optimálnímu návrhu a provozu zapotřebí uvažovat vlivy nejenom z oblasti energetiky, ale také odpadového hospodářství (OH). K pojmu efektivní je pak v této práci přistoupeno ze dvou stran, a to z pohledu jak ekonomické tak ekologické udržitelnosti.

V úvodu práce je uvedeno legislativní pozadí v předmětné oblasti a krátce je nastíněn evropský a český vývoj v odvětví OH. Je definován pojem směsný komunální odpad (SKO) jako podmnožina komunálního odpadu (KO) vhodná k energetickému využití při zachování legislativou stanovené hierarchie nakládání s KO. Dále jsou v této kapitole blíže popsány zařízení vhodná ke zpracování SKO. Těmito jsou skládky ostatních odpadů, mechanicko-biologická úprava (MBÚ) a samotné EVO.

V následující kapitole jsou stanoveny cíle práce a to v rámci výzkumných činností v „Sekci energetických systémů a simulačních výpočtů“ Ústavu procesního inženýrství. Je zde představen modulární systém optimalizačního nástroje NERUDA. Následně jsou prezentovány moduly, na jejichž tvorbě má největší podíl autor této dizertační práce. Hlavní náplň dizertační práce je pak rozdělena do dvou směrů, které představují dva vstupní moduly do úlohy nástroje NERUDA.

První z dílčích cílů je tvorba obecného technicko-ekonomického (T-E) modelu zařízení EVO, který je schopen generovat potřebné vstupy pro výpočty v nástroji NERUDA. Tento T-E model nese pracovní název Flexi model a je uzpůsoben k modelování široké škály technologických uspořádání. Hlavním výstupem je pak křivková závislost ceny za zpracování odpadu na zpracovatelské kapacitě pro lokality, kde lze s integrací EVO uvažovat. Model sám o sobě pak může například sloužit k analýze vlivu legislativní podpory výroby energií na výrobní ukazatele zařízení.

Druhou oblastí zájmu je posuzování vlivu na životní prostředí a implementace ekologického kritéria do nástroje NERUDA. Jako vhodné kritérium environmentálního dopadu pro oblast energetiky a OH byly stanoveny emise skleníkových plynů. Pro kvantifikaci tohoto kritéria byl zvolen parametr potenciál globálního oteplování (GWP) s jednotkou 1 kg CO<sub>2eq</sub>. Následně byl pomocí metody posuzování životního cyklu (LCA) stanoven GWP pro jednotlivé výše uvedené způsoby nakládání s odpady. Z výpočtů byl pro zařízení EVO stanoven obdobný vstup pro software NERUDA jako v případě ceny za zpracování, a to závislost GWP na zpracovatelské kapacitě. Zařízení MBÚ a skládky jsou popsány konstantní hodnotou GWP. Rozdílný přístup pro EVO je zvolen z důvodu závislosti produkce a úspory emisí skleníkových plynů na poměru výroby elektřiny a tepla, kdy s vyšší výrobou tepla roste i úspora skleníkových plynů. Na základě těchto vstupů bylo následně do účelové funkce v nástroji NERUDA implementováno ekologické kritérium pomocí součinu GWP a ceny emisních povolenek.

Vzhledem k současným evropským cílům snížení emisí skleníkových plynů je rozšíření nástroje NERUDA o ekologické kritérium aktuální tematikou. Využití propojení ekonomických a ekologických aspektů pro návrh optimálního rozložení kapacit zařízení EVO

v rámci OH napomáhá snižovat emise skleníkových plynů jak z odvětví energetiky, díky náhradě fosilních paliv, tak ze sektoru OH díky odklonu odpadu od skládkování.

Z výsledků uvedených v kapitole 5.2 vyplývá závěr, že se zvyšováním váhy ekologického kritéria se zvyšuje množství SKO zpracovaného ekologicky výhodnějším způsobem, ale zároveň stoupají celkové náklady na zpracování odpadů. V současnosti by přechod z OH produkující emise skleníkových plynů ke stavu OH redukující emise stál zhruba 210 Kč/obyvatele a rok.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] IPCC, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Institute of Global Environmental Strategies (IGES), on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Hayama, Japonsko, 2006.
- [2] EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, *EEA greenhouse gas - data viewer*, [online], 2016 [cit. 14. 01. 2017], Dostupné z: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>.
- [3] IPCC, *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva, Switzerland, 151 s., 2014.
- [4] GRAUS W. a WORRELL E., *Trend in efficiency and capacity of fossil power generation in the EU*, Energy Policy, 37, s. 2147–2160, 2009.
- [5] EU, *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkách odpadu*, Úřední věstník Evropské unie L 182, 1999.
- [6] EU, *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/12/ES ze dne 5. dubna 2006 o odpadech*, Úřední věstník Evropské unie L 114/9, 2006.
- [7] EU, *Směrnice evropského parlamentu a rady 98/2008/ES ze dne 19. listopadu o odpadech a o zrušení některých směrnic*, Úřední věstník Evropské unie L 312/3, 2008.
- [8] ČR, *Zákon č. 185/2001 Sb., ze dne 15. května 2001, o odpadech a o změně některých dalších zákonů*, Sbírka zákonů ČR, částka 71/2001.
- [9] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČR, *Návrh zákona o odpadech a o změně některých zákonů (zákon o odpadech)*, 2017.
- [10] EUROSTAT, *Municipal waste generation and treatment, by type of treatment method*, [online], 2016 [cit. 23. Duben 2017], dostupné z: <http://ec.europa.eu/eurostat/>.
- [11] ČR, *Vyhláška č. 93/2016 Sb. o Katalogu odpadů*, Sbírka zákonů, částka 38/2016.
- [12] ČR, *Zákon č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů*, Sbírka zákonů ČR, částka 59/2012.
- [13] ČR, *Vyhláška č. 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady*, Sbírka zákonů ČR, částka 105/2005.
- [14] ISOH - INTEGROVANÝ SYSTÉM ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ, *Registr zařízení*, [Online], 2017, [cit. 2017], dostupné z: <https://isoh.mzp.cz/RegistrZarizeni>.
- [15] BARLAZ M., CHANTON J. a GREEN R.B., *Controls on Landfill Gas Collection Efficiency: Instantaneous and Lifetime Performance*, Journal of the Air & Waste Management, 59:12, s. 1399-1404, 2009.

- [16] ČR, *Vyhláška č. 482/2005 Sb. o stanovení druhů, způsobů využití a parametrů biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy*, Sbírka zákonů ČR, částka 168/2005.
- [17] ČR, *Vyhláška č. 477/2012 Sb. o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu a o stanovení a uchovávání dokumentů*, Sbírka zákonů ČR, částka 180/2012.
- [18] VÁŇA J., *Mechanicko - biologická úprava odpadů [online]*, Biom.cz, dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/mechanicko-biologicka-uprava-odpadu>.
- [19] PAVLAS M., *Systém pro výpočet technologických parametrů procesů včetně*, Brno: Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství, vedoucí dizertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., 2008.
- [20] KROPÁČ J., *Pokročilý výpočtový nástroj pro návrh systému čištění spalin z procesu termického zpracování odpadů*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 158 s., vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc., 2012.
- [21] THE EUROPEAN IPPC BUREAU, *Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*, [online], 2006 [cit. 03. 03. 2017], dostupné z: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi\\_bref\\_0806.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf).
- [22] PAVLAS M., TOUŠ M., KLIMEK P. a BÉBAR L., *Waste incineration with production of clean and reliable energy*, Clean Technologies and Environmental Policy, 4 (13), s. 595 - 605, 2011.
- [23] REIMANN D. O., *CEWEP Energy Report III*, CEWEP, Bamberg, Německo, 2012.
- [24] STEHLÍK P., *Up-to-Date Waste-to-Energy Approach, From Idea to Industrial Application*, Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 115 s., ISBN: 978-3-319-15466-4, 2016.
- [25] ŠOMPLÁK R., FERDAN T., PAVLAS M. a POPELA P., *Waste-to-energy facility planning under uncertain circumstances*, Applied Thermal Engineering, 1 (61), s. 106-114, 2013.
- [26] ŠOMPLÁK R., PAVLAS M., KROPÁČ J., PUTNA O. a PROCHÁZKA V., *Logistic model-based tool for policy-making towards sustainable waste management*, Clean Technologies and Environmental Policy, 16, s. 1275 - 1286, 2014.
- [27] PAVLAS M. a ŠOMPLÁK R., *Predikování budoucích nákladů za zpracování odpadů s využitím nástroje NERUDA*, Týden výzkumu a inovací pro praxi 2015 - symposium Odpadové fórum, s. 1-12, ISBN: 978-80-85990-26- 3, 2015.
- [28] ŠOMPLÁK R., *Efektivní plánování investic do technologií pro energetické využití odpadů*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, s. 108, Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c., 2016.
- [29] IMANIRAD R., YANG X.-S. A YEOMANS J. S., *Stochastic Decision-Making in*

*Waste Management Using aFirefly Algorithm-Driven Simulation-Optimization Approach for Generating Alternatives*, Simulation-Driven Modeling and Optimization. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, č. 153, Springer, Cham, 2016.

- [30] MARTINEZ-SANCHEZ V., LEVIS J. W., DAMGAARD A., RANJITHAN S. R., DECAROLIS J. F., BARLAZ M. A. a ASTRUP T. F., *Optimization of municipal solid waste management using externality costs*, V Life Cycle Assessment and Other Assessment Tools for Waste Management and Resource Optimization, ECI Symposium Series, 2016.
- [31] XU Z., ELOMRI A., POKHAREL S., ZHANG Q., MING X. G. a LIU W., *Global reverse supply chain design for solid waste recycling under uncertainties and carbon emission constraint*, Waste Management, v tisku, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.024>, 2017.
- [32] MAHAJAN J. a VAKHARIA A. J., *Waste Management: A Reverse Supply Chain Perspective*, Vikalpa, 41 (3), s. 197 - 208, 2016.
- [33] KROPÁČ J., GREGOR J. a PAVLAS M., *Material vs. Energy Recovery – An Assessment Using Computational Tools NERUDA and JUSTINE*, In Pomberger, R., Trieb, T. (Eds.): Tagungsband zur 13. Recy & DepoTech- Konferenz. Leoben, Austria: Montanuniversität Leoben, s. 773-776. ISBN: 978-3-200-04777-8, 2016.
- [34] WILDOVÁ K., *Mechanicko-biologické způsoby zpracování odpadu*, Vysoké učení technické v Brně, bakalářská práce, vedoucí práce Ing. Jiří Kropáč Ph.D., 2017.
- [35] GREGOR J., PAVLAS M. a ŠOMPLÁK R., *Transportation cost as an Integral Part of Supply Chain Optimization in the Field of Waste Management*, Chemical Engineering Transaction, 56, v tisku, 2017.
- [36] FERDAN T., ŠOMPLÁK R. a PAVLAS M., *Improved feasibility analysis under volatile conditions: case of waste-to-energy*, Proceedings of the 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2014, 691 - 696.
- [37] FERDAN T. a PAVLAS M., *Podpora výroby energie v zařízeních na energetické využití odpadů*, Konference Odpadové fórum, 2013.
- [38] CLEARY J., *Life cycle assessments of municipal solid waste management systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature*, Environment International, 2009, s. 1256-1266, ISSN 0160-4120.
- [39] TONIOLO S., MAZZI A., GARATO V. G., AGUIARI F. a SCIPIONI A., *Assessing the “design paradox” with life cycle assessment: A case study of a municipal solid waste incineration plant*, Resources Conservation and Recycling, s. 109–116, 2014.
- [40] *ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*, International Organization for Standardization, 2006.
- [41] KIRKEBY J. T., BIRGISDOTTIR H., HANSEN T. L., CHRISTENSEN T. H., BHANDER G. S. a HAUSCHILD M., *Evaluation of environmental impacts from*



- municipal solid waste management in the municipality of Aarhus, Denmark (EASEWASTE)*, Waste Management & Research, 2006.
- [42] ARAFAT H. A., JIJAKLI K. a AHSAN A., *Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment*, Journal of Cleaner Production, 105 (2015), s. 233 - 240, ISSN 0959-6526.
- [43] PAVLAS M., *Justine – tool applied for forecasting in waste management*, [online], 2016 [cit. 2017], dostupné z: <http://www.upi.fme.vutbr.cz/veda-vyzkum/justine>.
- [44] ZAVÍRALOVÁ L., ŠOMPLÁK R., PAVLAS M., KROPÁČ J., POPELA P., PUTNA O. a GREGOR J., *Computational System for Simulation and Forecasting in Waste Management Incomplete Data Problem*, Chemical Engineering Transaction, 45 (2015), s. 763-769.
- [45] TERMIZO, a.s., *Technologie*, [online], 2017 [cit. 2017], dostupné z: <http://tmz.mvv.cz/technologie/>.
- [46] TOUŠ M., *Výpočtový systém pro výběr optimálního způsobu využití energie generované spalovacími procesy*, Brno: Vysoké učení technické Brno, Fakulta strojního inženýrství, 2012.
- [47] PAVLAS M., TOUŠ M., BENÁČKOVÁ J. a HEJL M., *Určení výhřevnosti směsného komunálního odpadu statistickou analýzou výrobních ukazatelů ze zařízení EVO*, Praha: V 58. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2011, Česká společnost chemického inženýrství, 139 - 150, ISBN: 978-80-905035-0-2, 2011.
- [48] PRAŽSKÉ SUŽBY a.s., *Energetické využívání odpadů*, [online], 2017 [cit. 2017], dostupné ze: <http://www.psas.cz/index.cfm/sluzby-firmam/zarizeni-pro-energeticke-vyuzivani-odpadu/energeticke-vyuzivani-odpadc5af/>.
- [49] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD ČR, *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 2/2017 ze dne 29. března 2017, kterým se mění cenové rozhodnutí ERÚ č. 5/2016, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie, ve znění cenového rozhodnutí ERÚ č. 9/2016 a č. 11/2016*, Energetický regulační věstník, částka 3/2017.
- [50] FERDAN T., ŠOMPLÁK R., ZAVÍRALOVÁ L., PAVLAS M. a FRÝBA L., *A Waste-to-Energy project: A complex approach towards the assessment of investment risks*, Applied Thermal Engineering, 89 (2015), s. 1127-1136.
- [51] PUTNA O., *Termické zpracování odpadů jako klíčový prvek efektivních systémů odpadového hospodářství*, Vysoké učení technické Brno, pojednání k dizertační práci, vedoucí prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c., 2017.
- [52] PUTNA O., JANOŠTÁK F., ŠOMPLÁK R. a PAVLAS M., *Short-time Fluctuations and Their Impact on Waste-to-Energy Conceptual Design Optimized by Multi-stage Stochastic Model*, Chemical Engineering Transactions, 61, v tisku, 2017.
- [53] FERDAN T., PAVLAS M., ŠOMPLÁK R., NEVRLÝ V., KLEMEŠ J. J. a PITSCHKE T., *Allocation Analysis of Waste Treatment Nodes for Economic Optimisation*

- Considering Reduces Greenhouse Gas Emissions*, Chemical Engineering Transactions, 61, 2017, akceptováno.
- [54] IPCC, *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories - Chapter 5 - Waste*, Institute of Global Environmental Strategies (IGES), on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Hayama, Japan, 2000.
  - [55] STOCKER T., QIN D., PLATTNER G.-K., TIGNOR M., ALLEN S., BOSCHUNG J., NAUELS A., XIA Y., BEX V. a MIDGEY P., *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
  - [56] CURRAN M. A., *Life Cycle Assessment: Principles and Practise*, U.S. Environmental protection agency, Work assignment 3-15, 2006.
  - [57] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model WARM*, 2016.
  - [58] ČR, *Vyhláška č. 480/2012 Sb. ze dne 20. prosince 2012 o energetickém auditu a energetickém posudku*, Sbírka zákonů ČR, částka 182/2012.
  - [59] OTE, a.s., *Národní energetický mix*, [online], 2016 [cit. 05. 03. 2017], dostupné z: <http://www.ote-cr.cz/statistika/narodni-energeticky-mix..>
  - [60] SLIVKA V. a kolektiv, *Studie stavu teplárenství*, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011.
  - [61] HÁJEK M., *Palivová základna pro teplárenství*, Mikulov: Příspěvek na PRO-ENERGY CON 2011.
  - [62] REINHART D. a BARLAZ M., *Landfill Gas Management: A Roadmap for EREF Directed Research*, North Carolina State University and University of Central Florida, 2010.
  - [63] BIFA UMWELTINSTITUT GMBH, *Aktualisierung der Ökoeffizienzanalyse für die Entsorgungsstrukturen Bayerns, Deutschlands und der Schweiz*, Analýza pro Bavorské ministerstvo životního prostředí, zdravotnictví a ochrany spotřebitelů, Augsburg, 2007.
  - [64] PLAVAC B., SUTLOVIĆ I. a FILIPAN V., *Flexibility of mechanical biological treatment plants*, Technical Gazette 23, 6(2016), 1871-1877.
  - [65] VOGT R., DERREZA-GREEVEN C., GIEGRICH J., DEHAUST G. a MÖCK A., *The Climate Change Mitigation Potential of the Waste Sector: Illustration of the potential for mitigation of greenhouse gas emissions from the waste sector in OECD countries and selected emerging economies; Utilisation of the findings in waste technology*, Federal Environment Agency, Dessau-Roßlau, Německo, July 2015.
  - [66] DEHOUST G., SCHÜLER D., VOGT R. A GIEGRICH J., *Climate Protection Potential in the Waste Management Sector Examples: Municipal Waste and Waste*

Wood, Federal Environment Agency (Umweltbundesamt), Dessau-Roßlau, 2010.

- [67] ARCHER E., BADDELEY A., KLEIN A., SCHWAGER J. a WHITING K., *Mechanical-Biological-Treatment: A Guide for Decision Makers - Processes, Policies and Markets*, Juniper Consultancy Services Ltd, 2005.
- [68] CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU, *Podíl dopravy na produkci skleníkových plynů*, [online], 2003 [cit. 2017], dostupné z: [http://www.cdv.cz/podil-dopravy-na-produkci-sklenikovych-plynu/..](http://www.cdv.cz/podil-dopravy-na-produkci-sklenikovych-plynu/)
- [69] ŠOMPLÁK R., SZÁSZIOVÁ L., SMEJKALOVÁ V., NEVRLÝ V., MÁLEK M. a PAVLAS M., *Současné toky a zpracování spalitelných odpadů v ČR*, České ekologické manažerské centrum, z. s., příspěvek na sympoziu Odpadové fórum, 2017.
- [70] EU, *Směrnice evropského parlamentu a rady 2003/87/ES ze dne 13. října 2003 o vytvoření systému pro obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů ve Společenství a o změně směrnice Rady 96/61/ES*, Úřední věstník L 275, 2003.
- [71] Evropská komise, *EU ETS Handbook*, Evropská unie, 2015.
- [72] EU, *Nařízení evropského parlamentu a rady o závazném každoročním snižování emisí skleníkových plynů členskými státy v období 2021–2030 pro potřeby odolné energetické unie a za účelem splnění závazků podle Pařížské dohody*, Evropská unie, 2016.
- [73] EU, *Návrh směrnice Evropského parlamentu a rady, kterou se mění směrnice 2003/87/ES za účelem posílení nákladově efektivních způsobů snižování emisí a investic do nízkouhlíkových technologií*, Evropská unie, 2015.
- [74] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Global Greenhouse Gas Emissions Data*, [online], 2016 [cit. 20. 2. 2017], dostupné z: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data..>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

zkratka	význam
<i>CDV</i>	Centrum dopravního výzkumu
<i>CF<sub>4</sub></i>	tetrafluormethan, fluorid uhličitý
<i>CFC-11</i>	trichlorofluoromethane, freon 11
<i>CH<sub>4</sub></i>	metan
<i>CO<sub>2</sub></i>	oxid uhličitý
<i>CZT</i>	centrální zásobování teplem
<i>ČR</i>	Česká republika
<i>DZE</i>	druhotné zdroje energie
<i>EVO</i>	energetické využití odpadů
<i>GWP</i>	Global Warming Potential
<i>HFC-134a</i>	1,1,1,2-tetrafluoroethan
<i>IPCC</i>	Mezivládní panel pro změnu klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change)
<i>IRR</i>	vnitřní výnosové procento (Internal Rate of Return)
<i>ISOH</i>	Integrovaný systém odpadového hospodářství
<i>KO</i>	komunální odpad
<i>KOT</i>	kondenzační odběrová turbína
<i>KVET</i>	kombinovaná výroba elektřiny a tepla
<i>LCA</i>	posuzování životního cyklu (Life Cycle Assessment)

<i>LHV</i>	výhřevnost (Lower Heating Value)
<i>MBÚ</i>	mechanicko-biologická úprava
<i>MÚ</i>	mechanické úpravy
<i>N<sub>2</sub>O</i>	oxid dusný
<i>OH</i>	odpadové hospodářství
<i>ORP</i>	obec s rozšířenou působností
<i>OZE</i>	obnovitelné zdroje energie
<i>PT</i>	protitlaká turbína
<i>SKO</i>	směsný komunální odpad
<i>TAP</i>	tuhé alternativní palivo
<i>T-E</i>	Technicko-ekonomický
<i>ÚPI</i>	Ústav procesního inženýrství
<i>VBA</i>	Visual Basic for Applications
<i>VUT</i>	Vysoké učení technické
<i>WiECC</i>	Waste-to-Energy Competence Centre

# SEZNAM PŘÍLOH

## **Příloha č. 1**

Uživatelské prostředí modelu ZEVO Malešice

## **Příloha č. 2**

Ukázka modelu ZEVO Malešice – vyhodnocení provozu v průběhu roku

## **Příloha č. 3**

Zjednodušené schéma zařízení EVO uvažovaného ve Flexi modelu

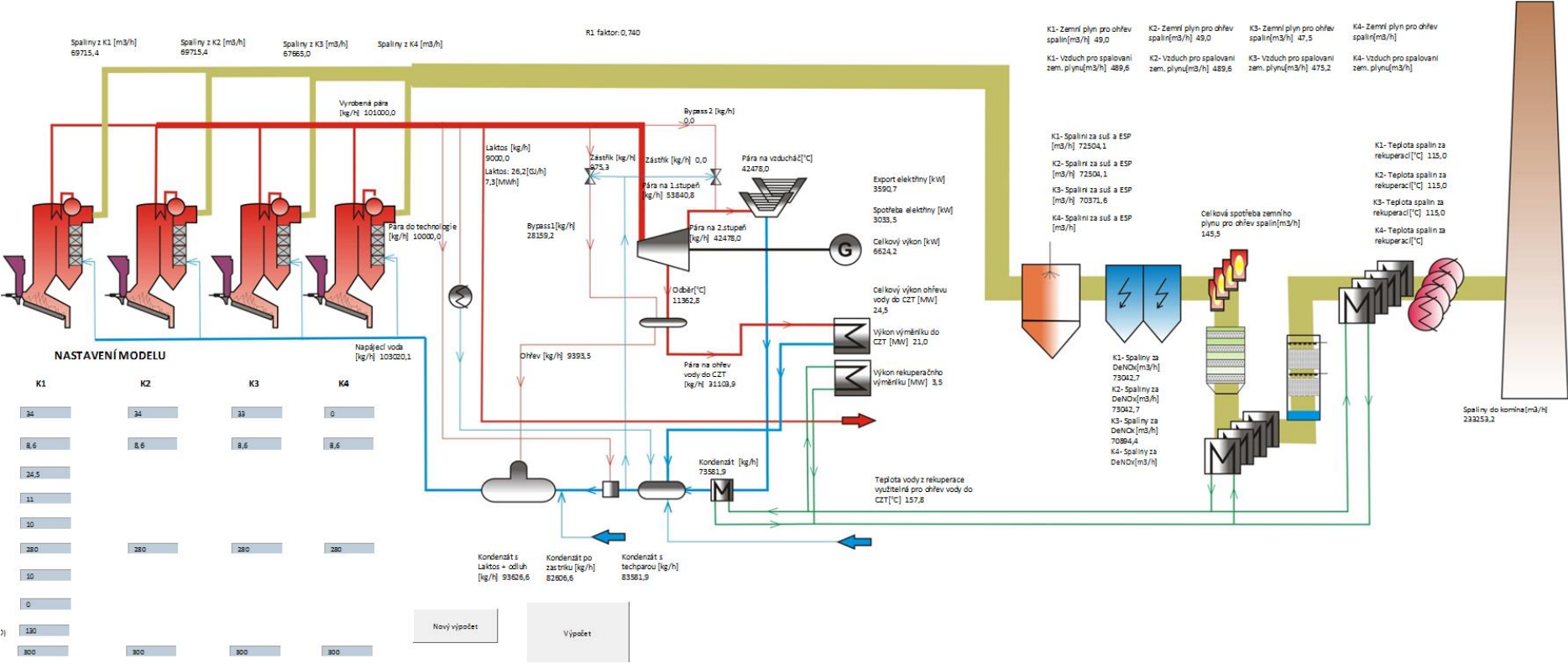
## **Příloha č. 4**

Zjednodušené modelové schéma varianty tech. 8 systému čištění spalin s „mokrou vypírkou“

## **Příloha č. 5**

Výsledné GWP pro řetězce zpracování SKO

Příloha č. 1 Uživatelské prostředí modelu ZEVO Malešice

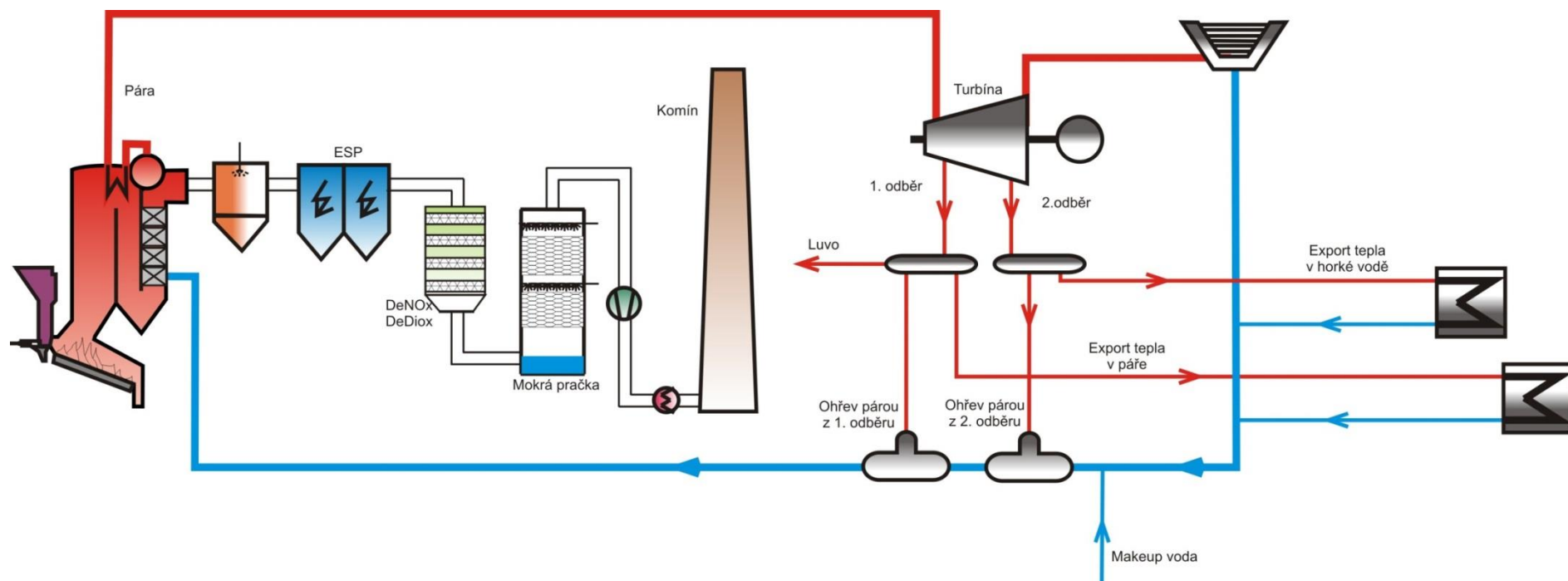


## Příloha č. 2 Ukázka modelu ZEVO Malešice – vyhodnocení provozu v průběhu roku

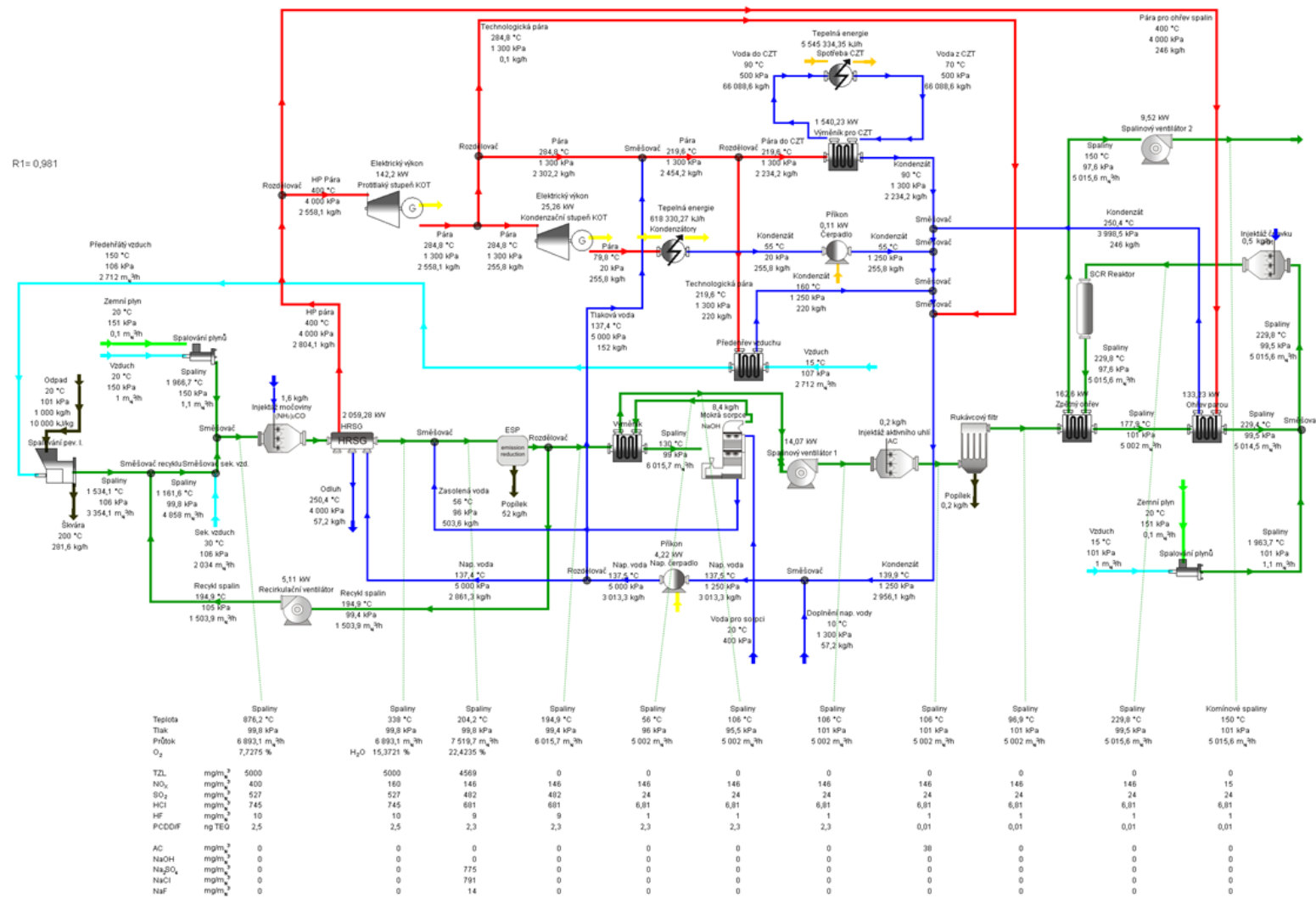
PARAMETRY			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
výkon kotlů v páře	K1	[t/h]	34	34	34	34	33	34	34	32	29	33	30	35		
	K2	[t/h]	34	34	34	34	33	34	34	32	29	33	30	35		
	K3	[t/h]	33	33	33	33	33	33	34	32	29	33	30	34		
	K4	[t/h]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
výhřevnost	K1	[GJ/t]	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6		
	K2	[GJ/t]	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6		
	K3	[GJ/t]	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6		
	K4	[GJ/t]	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6		
teplo do CZT		[MW]	25	24.5	22.5	23.5	16.5	16.5	17	21	15.5	24	20	29		
Laktos a spol.		[t/h]	10	11	10	9	8	8	8	9	9	9	9	10		
Technologická pára		[t/h]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10		
Teplota spalin na výstupu z kotle	K1	[°C]	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300		
	K2	[°C]	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300		
	K3	[°C]	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300		
	K4	[°C]	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300		
Pokles teploty rozpraš. Suš.	K1	[°C]	20	20	20	20	15	15	15	15	15	20	20	20		
	K2	[°C]	20	20	20	20	15	15	15	15	15	20	20	20		
	K3	[°C]	20	20	20	20	15	15	15	15	15	20	20	20		
	K4	[°C]	20	20	20	20	15	15	15	15	15	20	20	20		
Teplota spalin do DeNOx	K1	[°C]	285	285	285	285	280	280	280	280	285	285	285	285		
	K2	[°C]	285	285	285	285	280	280	280	280	285	285	285	285		
	K3	[°C]	285	285	285	285	280	280	280	280	285	285	285	285		
	K4	[°C]	285	285	285	285	280	280	280	280	285	285	285	285		
bypass turbíny 1		[t/h]	20	10	0	0	0	0	0	0	0	2	0	29		
bypass turbíny 2		[t/h]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Teplota HV za ŠO		[°C]	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135		
Fond pracovní doby		[h]	744	671.6	744	720	744	720	687.13	393.88	720	744	652.45	744		
Ostatní energie - Souhrn			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Import elektrické energie		[MWh]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Import tepla/páry		[MWh]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Plyn do spalovací komory	K1	[MWh]	600	1000	600	500	700	800	300	400	400	400	400	500		
	K2	[MWh]	600	1000	600	500	700	800	300	400	400	400	400	500		
	K3	[MWh]	600	1000	600	500	700	800	300	400	400	400	400	500	6600 [MWh]	6600 [MWh]
	K4	[MWh]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
VÝSLEDKY SIMULACE			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Spálený odpad		[t]	27332.2	24210.2	27457.8	26673.3	26773.6	26296.6	25936.1	13693.6	23014.6	27150.3	21543.1	28421.3	298.5 [kt]	
Celkový výkon generátoru		[MWh]	3677.3	3565.9	4754.1	4594.2	5627.4	5719.1	5533.8	2303.2	3952.9	4335.4	3341.9	3216.1		
Vlastní spotřeba		[MWh]	2186.6	1936.8	2196.6	2133.9	2141.9	2103.7	2074.9	1095.5	1841.2	2172.0	1723.4	2273.7		
Export el.		[MWh]	1490.7	1629.1	2557.5	2460.4	3485.5	3615.3	3458.9	1207.7	2111.7	2163.4	1618.5	942.4		
Demí		[t]	8942.9	8744.2	8942.9	7934.4	7425.1	7214.4	6898.8	4301.2	7732.8	8169.1	7046.5	8987.5	92339.8 [t]	
Teplo do CZT		[GJ]	66960.0	59235.1	60264.0	60912.0	44193.6	42768.0	42052.4	29777.3	40176.0	64281.6	46976.4	77673.6		
		[MWh]	18600.0	16454.2	16740.0	16920.0	12276.0	11880.0	11681.2	8271.5	11160.0	17856.0	13049.0	21576.0		
Export ostré páry (Laktos)		[GJ]	21643.0	21490.5	21643.0	18850.3	17314.4	16755.8	15990.9	10312.2	18850.3	19478.7	17081.8	21643.0		
		[MWh]	6011.9	5969.6	6011.9	5236.2	4809.5	4654.4	4441.9	2864.5	5236.2	5410.7	4744.9	6011.9	61403.8 [MWh]	
Množství plynu na ohřev spalin		[m3]	140141.6	124133.8	140785.5	136763.3	68468.6	67248.8	66326.9	35018.9	88502.7	139208.9	110458.8	145725.9		



Příloha č. 3 Zjednodušené schéma zařízení EVO uvažovaného ve Flexi modelu



## 90



**Příloha č. 5 Výsledné GWP pro řetězce zpracování SKO**

<b>I</b>	<b>EVO</b>	<b>Svoz odpadu</b>	<b>Transport odpadu</b>	<b>Spotřeba energií</b>	<b>Spotřeba zemního plynu</b>	<b>Transport škváry a popílku</b>	<b>Recyklace kovů</b>	<b>Spalování SKO</b>	<b>Produkce energií</b>	<b>Celkem s dopravou</b>	<b>Celkem bez dopravy</b>	<b>Doprava %</b>
	<b>GWP [kg CO<sub>2eq</sub>/r]</b>	53900	15000	48000	135600	3300	-108000	3851833	-5464481	-1464847	-1537047	4.70%
<b>II</b>	<b>MBÚ</b>	<b>Svoz odpadu</b>	<b>Transport odpadu</b>	<b>Spotřeba energií</b>	<b>Únik plynu ze stabilizace</b>	<b>Recyklace kovů</b>	<b>Transport TAP</b>	<b>Spalování TAP</b>	<b>Produkce energií</b>	-	-	-
	<b>GWP [kg CO<sub>2eq</sub>/r]</b>	53900	10000	483185	107192	-276000	4800	2877494	-3716897	-456325	-525025	13.09%
<b>III</b>	<b>Skládka</b>	<b>Svoz odpadu</b>	<b>Transport odpadu</b>	<b>Spotřeba energií</b>	<b>Únik skládkové ho plynu</b>	<b>Energetic ké využití skládkové ho plynu</b>	-	-	-	-	-	-
	<b>GWP [kg CO<sub>2eq</sub>/r]</b>	53900	10000	41000	9413260	-665043	-	-	-	8853116	8789216	0.73%
<b>IV</b>	<b>EVO</b>	<b>Svoz odpadu</b>	<b>Transport odpadu</b>	<b>Spotřeba energií</b>	<b>Spotřeba zemního plynu</b>	<b>Transport škváry a popílku</b>	<b>Recyklace kovů</b>	<b>Spalování SKO</b>	<b>Produkce energií</b>	-	-	-
	<b>GWP [kg CO<sub>2eq</sub>/r]</b>	26950	7500	24000	67800	1650	-54000	1925917	-2732240	-732424	-768524	4.70%
	<b>Skládka</b>	<b>Svoz odpadu</b>	<b>Transport odpadu</b>	<b>Spotřeba energií</b>	<b>Únik skládkové ho plynu</b>	<b>Energetic ké využití skládkové ho plynu</b>	-	-	-	-	-	-
	<b>GWP [kg CO<sub>2eq</sub>/r]</b>	26950	5000	20500	4706630	-332522	-	-	-	4426558	4394608	0.73%
	<b>EVO + skládka</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	3694134	3626084	1.88%